

Institut für Struktur- und Funktionskeramik Montanauniversität A – 8700 Leoben	Kand. Dipl.-Wirt. Ing (FH) Marinko Lekic-Ninic	Oktober, 2012
---	---	---------------


## **Entwicklung eines neuen Sauerstoffblaselanzenkopfes für den LD-Konverter unter Verwendung von keramischen Werkstoffen**

Beim LD-Verfahren wird ein Konverter, der so genannte LD-Konverter, mit flüssigem Roheisen und einem Kühlmittel (Schrott oder Eisenschwamm) beschickt. Danach wird Sauerstoff durch Düsen in einer ausfahrbaren wassergekühlten Sauerstofflanze auf die Eisenschmelze geblasen. Dadurch kommt es zu einer intensiven Bewegung des Bades, die noch durch Einblasen von Inertgasen durch die Düsen über den Konverterboden verstärkt wird. Die Blasedauer beträgt zwischen 10 und 20 Minuten. Sie wird so gewählt, dass die gewünschte Entkohlung und die Verbrennung der unerwünschten Beimengungen im Roheisen erreicht werden. Die verbrannten Eisenbegleiter entweichen als Gase oder werden durch zugesetzten Kalk in der flüssigen Schlacke gebunden.

Das vordere Ende der Sauerstofflanze, der Sauerstoffblaslanzenkopf, ist sehr großen chemischen, thermischen und mechanischen Beanspruchungen ausgesetzt. Als Werkstoff für den Lanzenkopf wird Kupfer in gegossener oder geschmiedeter Ausführung verwendet. Durch dessen hohe Wärmeleitfähigkeit ist eine wirksame Kühlung möglich. Außerdem weist Kupfer eine geringe Benetzbarkeit durch flüssigen Stahl auf. Durch die hohen Beanspruchungen kommt es jedoch zum Verschleiß des weichen und relativ niedrig schmelzenden Kupfers, insbesondere zu Abrundungen an den Düsenaustrittsöffnungen. Dies führt zu einer unerwünschten Veränderung der Strömungsverhältnisse beim gesamten Prozess. Besonders gefährlich dabei ist das „Durchbrennen“ der Mitte des Lanzenkopfes, was zu einem starken Wassereintritt in den Tiegel und damit zu einer explosionsartigen Verpuffung führt. Dies kann Menschen und Betriebseinrichtungen gefährden. Die Lebensdauer des Lanzenkopfes ist je nach Ausführung und Beanspruchungsstärke sehr unterschiedlich. Sie beträgt zwischen 10 und 300 Einsätzen.

Ziel dieser Arbeit ist das Erstellen eines Konzeptes für die Entwicklung eines neuen Lanzenkopfes ohne Kühlung in seinem unteren Bereich. Damit soll die Kühlung verringert und Platz geschaffen werden, um Sensoren einzubauen, welche Prozessdaten wie z.B. die Temperatur des Stahlbades oder der Abstand der Lanzenspitze zum Stahlbad erheben. Dies sollte so einer deutlichen Kosteneinsparung im Prozess führen. Es ist davon auszugehen, dass ein ungekühlter Kopf nur mit Verwendung keramischer Werkstoffe realisiert werden kann.

o. Univ.- Prof. Dr. Robert Danzer

<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik Montanauniversität A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH) Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	---


## **Die Entwicklung eines neuen Sauerstoffblaselanzenkopfes für den LD-Konverter mit Verwendung keramischer Werkstoffe**

**Dissertationsarbeit am  
Institut für Struktur- und Funktionskeramik**


**Montanauniversität Leoben**

Leoben, Oktober 2012

Dipl.-Wirt.-Ing (FH)  
Marinko Lekic- Ninic

<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik Montanauniversität A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH) Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	---

Diese Arbeit widme ich meinem Vater†, der uns viel zu früh verlassen hat.

<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik Montanauniversität A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH) Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	--

Die hier vorliegende Arbeit entstand an den vom Herrn o. Univ. Prof. Dr. Robert Danzer geleitetem Institut für Struktur- und Funktionskeramik der Montanauniversität Leoben während meiner Tätigkeit als externer Doktorand in Rahmen einer Forschungs Kooperation mit Siemens VAI Metals Technologies GmbH. Für meine Doktorarbeit schulde ich sehr vielen Menschen einen herzlichen Dank.

Besonders möchte ich mich bei meinem Doktorvater bedanken, denn Sie brachten mir sehr viel Geduld entgegen und sorgten mit wertvollen Ratschlägen für das Gelingen der Arbeit,


mein Dank gilt zudem Zweitprüfer Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Johannes Schenk, Leiter des Lehrstuhls für Metallurgie an der Montanuniversität Leoben,

bei allen Mitarbeiter der Siemens VAI Metals Technologies GmbH, die mir für die Ausarbeitung dieser Arbeit wichtiges Datenmaterial zur Verfügung gestellt haben, insbesondere Hrn. Stefan Lechner, MBA und Hrn. Mag. Peter Wieser,


bei allen Mitarbeiter des Instituts für Struktur- und Funktionskeramik der Montanauniversität Leoben, die mir mit viel Zeitaufwand wichtiges Datenmaterial zur Verfügung gestellt haben.

Ganz herzlich bedanke ich mich auch bei meiner Familie, bei meinen Eltern, und bei meinen Geschwistern, die mich während des Studiums unterstützt haben.


Ganz besonderes möchte ich mich bei meiner Gattin Daniela und meinen lieben Söhnen Nico und Luca für Ihr Verständnis und Ihre Unterstützung während des gesamten Studiums bedanken.

<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik Montanauniversität A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH) Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	---

1. EINFÜHRUNG	7
2. AUSGANGSSITUATION UND STAND DER FORSCHUNG	8
2.1 Allgemeines zur Stahlherstellung	8
2.1.1 Entwicklung und Stand des LD- Verfahrens	9
2.1.2 Der Ablauf des LD- Prozesses	11
2.1.3 Die Entkohlung der Metallschmelze	12
2.1.4 Einstellung des Stickstoffgehaltes	14
2.1.5 Entphosphorung der Metallschmelze	15
2.1.6 Schlackenbildung beim LD- Verfahren	15
2.1.7 Entschwefelung der Metallschmelze	17
2.2 Auslegung und Form des Konverters und der Lanze beim LD-Verfahren	17
2.2.1 Konvertertiegel	17
2.2.2 Sauerstofflanze	19
2.2.3 Lanzenkopf	20
2.2.4 Fahrweise und Position der Lanze im Konverter	22
2.2.5 Lavaldüsen	25
2.2.6 Patente für neue Lanzenköpfe	30
3. BEANSPRUCHUNGEN DES LANZENKOPFES UND DER DÜSEN	37
3.1 Strömungsverhältnisse im Bereich des Lanzenkopfes	39
3.2 Thermische Bedingungen im Bereich des Lanzenkopfes	46
4. ZIELSETZUNG UND LÖSUNGSWEG	55
4.1 Der Lösungsansatz mit der Ringspaltdüse	56
4.2 Auslegung des Ringspaltes für Schutzgaszuführung	58
5. ALLGEMEINE ÜBERLEGUNGEN ZUM EINSATZ VON HOCHLEISTUNGSKERAMIK	64
5.1 Thermische Beständigkeit	66
5.2 Chemische Beständigkeit	67
5.3 Thermoschock- und Temperaturwechselbeständigkeit	68
6. KONSTRUIEREN MIT KERAMIK	70
6.1 Allgemeine Konstruktionsprinzipien für keramische Werkstoffe	71
6.2 Verbindungstechniken	74
7. UNTERSUCHUNGEN ZUR WERKSTOFFAUSWAHL	76
7.1 Werkstoffauswahl für die Lavaldüsen	77
7.1.1 Einsatz der faserverstärkten oxydischen Verbundwerkstoffen für die Lavaldüsen	78
7.2 Werkstoffauswahl für die Stirnplatte	86
7.2.1 Feuerfestkeramiken als Werkstoffe für die Stirnplatte	87
7.2.2 Faserverstärkte oxydische Verbundwerkstoffe als Werkstoffe für die Stirnplatte	90
7.2.3 Werkstoffe auf Kohlenstoffbasis für die Schutzplatte	92
8. DIE NEUE KONSTRUKTION DES SAUERSTOFFBLASELANZENKOPFES	95
8.1 Lavaldüsen	97
8.2 Schutzsystem des Lanzenkopfes	99

<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik Montanauniversität A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH) Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	---

9. EXPERIMENTELLE DURCHFÜHRUNG	103
9.1 Thermoschockversuche	104
9.2 Thermoschockversuche an der Lavaldüse	106
9.3 Druck- und Strömungsversuche an der Lavaldüse	110
9.4 Versuche an Prototypen des neuen Lanzenkopfes an der RWTH in Aachen	113
9.5 Test des Lanzenkopfes bei Arcelor Mittal Eisenhüttenstadt (AME)	132
9.5.1 Ziele der Testkampagne:	133
9.5.2 Festgelegte Test- bzw. Messprozedur	134
9.5.3 Voraussichtlicher Einfluss des Einsatzes des neuen Lanzenkopfes auf den BOF Prozess:	135
9.5.4 Ergebnisse der Versuche bei AME	136
10. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	143
11. REFERENZEN	146


<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik Montanauniversität A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH) Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	--

## 1. Einführung

Nachdem am 31. Jänner 1950 das LD- Verfahren zur Herstellung von technisch reinem Eisen von der Vereinigten Österreichischen Eisen- und Stahlwerke AG in Linz zum Patent angemeldet worden war, sind zahlreiche wissenschaftliche Arbeiten zur Verbesserung und Optimierung hinsichtlich Konstruktion des Konverters seiner Kapazität , der Zusammensetzung der Schmelze und der Legierungsmöglichkeiten [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7] der feuerfesten Ausmauerung des Konverters [8, 9], der Zusammensetzung der Schlacken [8], der Gasspülung über dem Konverterboden [4], der Kippeinrichtungen des Konverters [6], sowie bezüglich fast aller anderen für dem Prozess wichtigen Parameter erschienen. Diese Arbeiten sind bei weitem noch nicht abgeschlossen. Obwohl die Sauerstofflanze mit dem daran angeschweißten Lanzenkopf eine Schlüsselrolle beim LD- Verfahren spielt, gehen in diesem Bereich die Entwicklungen aber relativ langsam voran.

Wesentliche Neuerungen im Bereich der Sauerstofflanze sind EDV-Programme für die Winkelauslegung der Düsen in Abhängigkeit von der Konverterdaten [11] oder Versuche, den Aufblasprozess in einer Simulation [12] abzubilden. Diese Simulationen erweisen sich jedoch häufig als wenig aussagekräftig, da die benötigten Parameter meist nur angenommen (i.e. geschätzt) aber nicht experimentell bestimmt wurden, und es auf Grund der Komplexität des Blasprozesses fast unmöglich ist, diesen praxisnahe darzustellen.

Ein Blick in die Praxis zeigt, dass die Sauerstofflanze seit Ihrer Erfindung in Hinblick auf Konstruktion, eingesetzte Materialien sowie ihrer Funktion im Wesentlichen unverändert geblieben ist. Gründe dafür gibt es viele: Zum einen ist die Stahlindustrie sehr konservativ. Nur ungern wird Neuland betreten, solange die vorhandenen Komponenten ihre Funktion erfüllen. Die ständig steigende Nachfrage nach Stahl übt großen Druck aus, die Produktion zu steigern, und lässt wenig Spielraum für Neuentwicklungen. Erschwerend kommt hinzu, dass es sich um sehr teure und für Mensch und Umwelt gefährliche Prozesse handelt. Zum anderen haben sich Lieferanten und Hersteller der Komponenten mit der Zeit oft zu Monopolisten bzw. Marktführern entwickelt. Deren wirtschaftliches Interesse stehen Neuentwicklungen, die zur Verlängerung der Lebensdauer, d.h. zur Verringerung der Verkaufszahlen führen, eher entgegen. Neue Konstruktion und der Einsatz neuer Werkstoffe (wie z.B. von technischen Keramiken) wird durch die noch geringen Kenntnisse über diese alternativen Möglichkeiten erschwert. Andererseits weisen die Materialwissenschaftler meist wenig Erfahrung über den komplizierten Stahlherstellungsprozess auf. Für derartige Neuentwicklungen ist eine interdisziplinäre Vorgehensweise und somit Kenntnisse mehrerer Fachdisziplinen erforderlich.

<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik Montanauniversität A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH) Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	--

## 2. Ausgangssituation und Stand der Forschung

In den folgenden Abschnitten wird der Stand der Fachliteratur zu dem in dieser Arbeit betrachteten Themenbereich dargestellt. Zuerst wird auf den Kenntnisstand hinsichtlich der Stahlerzeugung eingegangen. Im Anschluss daran werden die Neuentwicklungen und die Patentliteratur beleuchtet.

### 2.1 Allgemeines zur Stahlherstellung


Wie in [2] beschrieben versteht man „unter Stahl alle Eisenlegierungen, die im festen Zustand verformbar sind. Von den Eisenkohlenstofflegierungen sind dies jene, welche weniger als 2,1% C enthalten. In Verallgemeinerung dieser Grenze werden alle Eisenlegierungen mit weniger als 2,1% C als Stahl bezeichnet. Ausgenommen wird allerdings das sog. Gusseisen mit Kugelgraphit, das im festen Zustand ebenfalls verformbar ist. Es enthält aber mehr als 2,1% C und wird deswegen zu den Gusseisensorten gezählt“ [2].<sup>1</sup>

Wie kaum ein anderes Material findet Stahl Verwendung in den unterschiedlichsten Bereichen des alltäglichen Lebens. Z.B. werden in der Haushaltsgeräteindustrie, der Bauindustrie, im Maschinen- und Kraftwerkbau oder in der Automobilindustrie erfolgreich Stahlprodukte eingesetzt. Stahl hat Tradition und ist auch ein High- Tech Werkstoff der Zukunft. Die gewünschten Eigenschaften des Stahles werden zuerst durch seine chemische Zusammensetzung und dann durch Maßnahmen der Wärmebehandlung und Verformung erreicht. Die chemische Zusammensetzung des Stahles wird im ersten Schritt der Stahlherstellung (oft auch als Stahlherstellung im engeren Sinne bezeichnet) festgelegt. Der flüssige Stahl wird nach dem Gießen dann in weiteren Schritten verformt und/oder wärmebehandelt. Für die Herstellung von Stahl werden Roheisen, Schrott und Eisenschwamm als Rohprodukte eingesetzt. Die Zusammensetzung dieser Stoffe unterliegt großen Schwankungen, die im Verlauf des Stahlherstellungsprozesses ausgeglichen bzw. raffiniert werden müssen. „Raffination und Legierung werden im schmelzflüssigen Zustand durchgeführt“ [2]. Während Roheisen bereits flüssig vorliegt, befinden sich Schrott und Eisenschwamm im festen Zustand. Für die Raffination des flüssigen Roheisens im LD-Konverter wird die notwendige Energie durch die Wärme gedeckt, die bei der aus der Oxidation der Roheisenbegleitelemente durch den Sauerstoff frei wird. Der Sauerstoff wird durch eine Mehrlochdüse der Sauerstofflanze durch vertikales Aufblasen auf die Schmelze zugeführt.

Im Konverter erfolgt die Herstellung des flüssigen Rohstahls, dass danach in der Sekundärmetallurgie legiert und behandelt wird und danach zu sogenannten Stahl-Halbzeugprodukten vergossen. Um die Umgebungsbedingungen der wassergekühlten

<sup>1</sup> Falls nicht anders erwähnt erfolgen alle Angaben in Gewichtsprozent



<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik Montanauniversität A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH) Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	--


Sauerstofflanze bzw. des Lanzenkopfes zu erläutern, wird hier ein Überblick aus der Vielfalt sowohl der metallurgischen Ein- und -Mehrstoffsysteme als auch der physikalisch-, thermodynamisch- und chemische Vorgänge gegeben. Wie anfangs erwähnt gibt es hierzu zahlreiche fachliche Untersuchungen und Veröffentlichungen, die mittlerweile dem metallurgischen Standardwissen zuzurechnen sind. Sie werden in dieser Arbeit als theoretische Grundlage für spätere Erläuterungen meist unverändert übernommen.

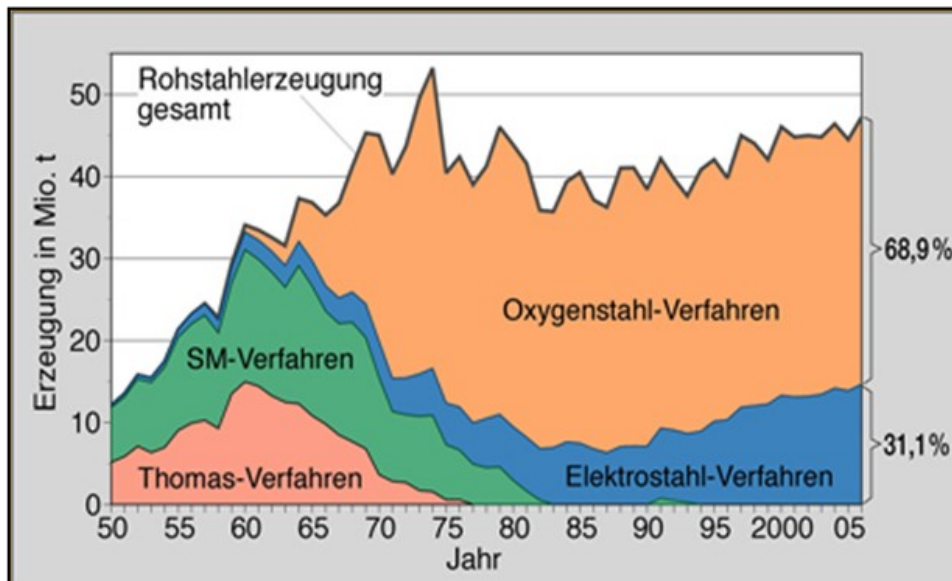
Besonderer Wert wird auf die Wechselwirkungen dieser Prozesse mit der Sauerstofflanze gelegt. So werden bei der Raffination chemische Einwirkungen wie Oxidation, Schlackenbehandlung, Entgasung, Desoxidation, Spülbehandlung beschrieben. Die Gesetzmäßigkeiten, die diese Prozesse und die dabei ablaufenden Vorgänge regeln, sind der Chemie und der Thermodynamik zuzuschreiben. „Bei der Raffination kommt es nicht nur auf den chemischen Umsatz der beteiligten Stoffe an sich sondern auch auf die nötige Kinetik (z.B. Zu- und Abfuhr von Reaktionspartnern, Geschwindigkeit der chemischen Reaktionen, etc.) an. Desgleichen müssen die bei den Einschmelzvorgängen auftretenden Wärmemengen in angemessener Zeit umgesetzt werden“ [2].

„Die Geschwindigkeit von Transportvorgängen hängt von der Größe der Austauschflächen ab. In feindispersen Systemen laufen Transportvorgänge daher in der Regel schneller als in kompakten Systemen ab“ [2]. Dies wird in der Metallurgie zur Erzielung hoher Reaktionsraten ausgenutzt.

### **2.1.1 Entwicklung und Stand des LD- Verfahrens**

Das LD-Verfahren, LD steht für Linz- Donawitz, wurde in den Jahren 1949 bis 1952 von Ingenieuren der Voestalpine entwickelt und setzte bald zu einem ungeahnten Siegeszug rund um die Welt an. Wie in der Abb. 1. zu sehen entfallen heute mehr als 60 Prozent der weltweiten Rohstahlproduktion auf das LD-Verfahren [3]. Weitere 35 Prozent der Weltstahlproduktion entfallen auf das Elektrolichtbogenofen-Verfahren, bei dem Schrott mittels elektrischer Energie über Graphitelektroden aufgeschmolzen wird [3]. Anderen, älteren Verfahren wie dem Siemens-Martin-Verfahren kommen heute immer weniger Bedeutung zu, da die Vorteile des LD- Verfahrens deutlich überwiegen. Von besonderer Bedeutung ist dabei, dass mit dem LD-Verfahren sehr große Mengen Stahl mit relativ geringen Investitions- und Verarbeitungskosten hergestellt werden können. Im Weiteren überzeugt der LD-Stahl durch seine besondere Qualität und seine sehr guten mechanischen Kennwerte.

<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik</b> <b>Montanauniversität</b> <b>A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH)</b> <b>Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	--



**Abb. 1:** Entwicklung der Weltrohstahlproduktion und der Stahlerzeugungsverfahren von 1950 bis 2005, aus [3]. Das LD- Verfahren ist hier als Oxygenstahl-Verfahren zu finden.

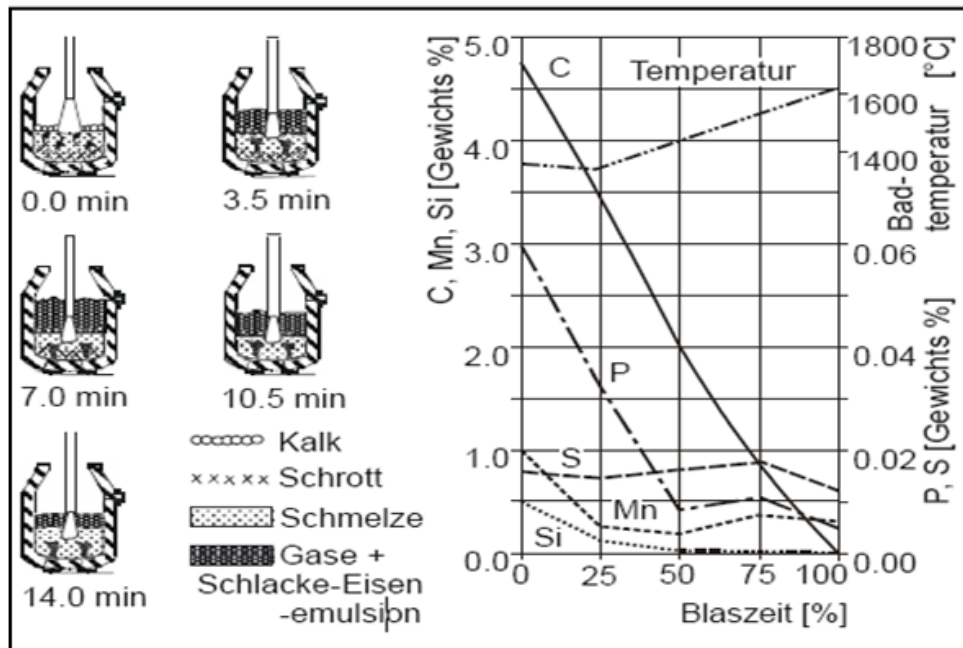
In der österreichischen Patentschrift Nr. 174069 [1] „Verfahren zur Herstellung von technisch reinem Eisen“, angemeldet am 31. Jänner 1950, sind die wesentlichen Merkmale des LD-Prozesses erstmals wie folgt beschrieben: „Gegenstand der Erfindung bildet ein Verfahren zur Herstellung von technisch reinem Eisen mit Summe der Verunreinigungen an Kohlenstoff, Silizium, Mangan, Phosphor, Schwefel, Stickstoff von 0.15 bis 0.25 % durch Frischen von Roheisen im basisch ausgekleideten Konverter mit reinem auf das Bad aufgeblasenen Sauerstoff, wobei der Sauerstoffstrahl vorzugsweise ungefähr auf den mittleren Bereich der Metalloberfläche unter solchen Bedingungen zur Einwirkung gelangt, dass ein tiefes Eindringen des Sauerstoffstrahles in das Metallbad vermieden und eine äußerst heiße Schlacke erzielt wird“. Dann heißt es weiter: „Bei dem erfindungsgemäßen Verfahren wird an der Berührungsfläche zwischen Schlacke und Schmelze am Reaktionszentrum eine außergewöhnlich hohe, sonst nicht übliche Temperatur erzeugt. Dabei ist die Temperatur an der Wirkstelle des Sauerstoffs vorzugsweise in der Mitte der Badfläche im Konverter am höchsten und nimmt in Richtung zur Konverterausmauerung ab“ [4]

Es wird in der Patentschrift weiteres auf die Wirkung der Schlacke in dem Prozess hingewiesen, wodurch die Schlackenmenge, die zur Aufnahme der Eisenbegleiter aus der Stahlschmelze notwendig ist, gering gehalten werden kann. Eine Verbesserung des LD-Verfahrens kann erfolgen, indem ein Inertgas durch den Konverterboden eingeblasen und gleichzeitig der Frischvorgang mit der Blaslanze von oben durchgeführt wird. Das Einblasen des Inertgases erfolgt durch poröse Bodensteine. Als Rührgase verwendet man dabei Stickstoff oder Argon.




### 2.1.2 Der Ablauf des LD- Prozesses

Nach dem Chargieren von Schrott, Roheisen und Kalk wird die wassergekühlte Sauerstoffflanze von Ihrer Startposition in den Konverter eingefahren, und Sauerstoff bei einem Druck von etwa 10 bar mit Überschallgeschwindigkeit durch einen Lanzenkopf mit Mehrlochdüsen auf die Roheisenschmelze geblasen (siehe Abb. 2) [4].



**Abb. 2:** Ablauf eines durchschnittlichen LD- Prozesses (links) und typischer Abbrand der Eisenbegleitelemente in Funktion der Blasezeit und Temperatur (rechts), aus [4].

Wie in der Literatur beschrieben „trifft der Sauerstoffstrahl direkt auf das flüssige Roheisen und seine kinetische Energie bringt die Schmelze in Bewegung. Sie beginnt zu zirkulieren: radial auswärts zur Oberfläche, abwärts entlang der Wand und aufwärts hin zum Auftreffbereich des Sauerstoffs. Dort beginnt gleichzeitig auch die Oxidation des Eisens, des Kohlenstoffs und der übrigen Roheisenbegleiter. Dadurch entsteht im sogenannten Brennfleck eine Temperatur von über 2000 °C, die zur Verdampfung von Eisen und Eisenbegleitelementen führt“ [4]. Unter dem Begriff Brennfleck ist hier der Raum zwischen der Lanzenspitze und Metallschmelze gemeint. Die Reihenfolge und die Geschwindigkeit des Abbrandes der Eisenbegleiter wird durch ihre Sauerstoffaffinität, ihre Aktivität in der Metallschmelze, Aktivität ihrer Reaktionsprodukte in der Schlacke, die Reaktionsfähigkeit der Schlacke und die Blasparameter festgelegt. In der Abb.2, rechts, ist als Beispiel das Abbrandschaubild einer 150 t-Schmelze dargestellt, wobei neben dem Schrott noch LD-Staubbriketts als Kühlmittel zugesetzt wurden [4]. Zu Blasbeginn reagieren zunächst aufgrund der höheren Sauerstoffaffinitäten bei den noch niedrigen Badtemperaturen das Silizium, Phosphor und das Mangan mit dem Sauerstoff. Das Silizium wird in den ersten Minuten fast vollständig oxidiert, unabhängig von seinem Anfangsgehalt. Die Siliziumverschlackung

<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik Montanauniversität A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH) Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	--

liefert gleichzeitig die erforderliche Wärme für die Temperaturerhöhung des Metallbades. Im Unterschied zum Silizium wird das Mangan nicht vollständig aus dem Metallbad entfernt. Während des Blasprozesses kann es dabei zur Reduktion des Manganoxides aus der Schlacke und sogar zum Anstieg des Mangangehaltes im Metallbad kommen. Auch der Phosphor zeigt einen starken Abfall der Badgehalte in der ersten 30-50% der Blasezeit. Es kommt dann allerdings zu seinem verzögerten Verschlackungsverlauf bzw. zu einer leichten Rückphosphorung bei 50-70% der Blasezeit, welcher dann erst im Bereich von 90-100% der Blasezeit auf die endgültige Phosphorkonzentration abfällt.

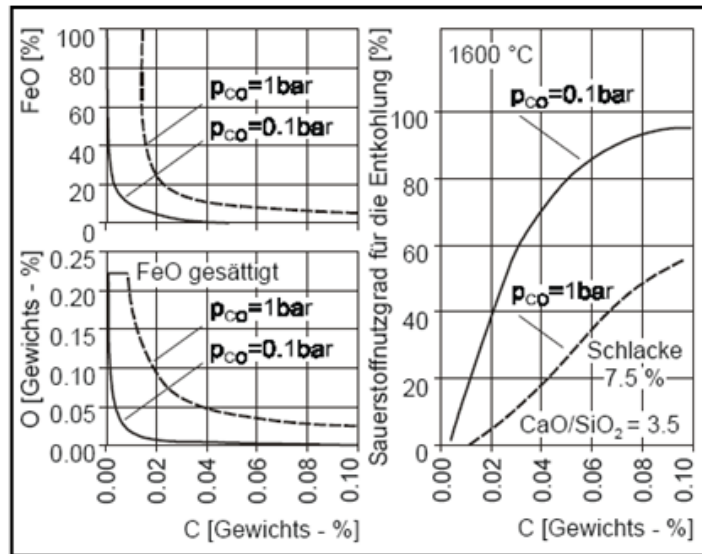
Während der Abbrand der Elemente Silizium, Mangan, Phosphor und insbesondere des Kohlenstoffseine mit dem Sauerstoffangebot fast proportionale Bereitstellung von reaktionswärmen für das System erwarten lässt, zeigt der Temperaturverlauf in Abb.2. deutlich, dass die Temperatur des Metallbades keineswegs diesem Wärmeangebot folgt. Vielmehr sinkt sie von einem anhänglichen Mittelwert von etwa 1320° C auf im Mittel 1250° C nach 20% der aufgeblasenen Sauerstoffmenge ab. Erst nach 40% der aufgeblasenen Sauerstoffmenge steigt der Temperaturwert über der Ausgangstemperatur auf 1360° C um dort stetig bis auf die angestrebte Temperatur anzusteigen.

Der Temperaturabfall kurz nach Blasbeginn ist durch die Kühlwirkung des Schrottes zu erklären. Dabei stammt die Energie für die Schrottauflösung vor allem aus dem Wärmeinhalt des Roheisens. Der weitere Temperaturanstieg bis zum Blasende ist mit weiteren Oxidation der Elemente P und Mn und insbesondere des Kohlenstoffs verbunden.

### **2.1.3 Die Entkohlung der Metallschmelze**

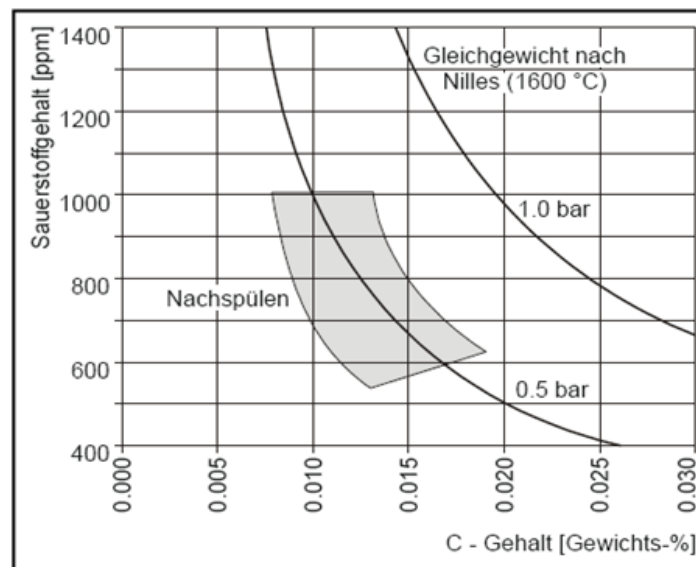
Die Entkohlung der Metallschmelze beginnt mit einer Anlaufphase. Aufgrund des großen Sauerstoffangebots verläuft die Entkohlungsreaktion nach Beendigung der Siliziumverschlackung mit größerer Geschwindigkeit. Kurz vor Blasende, wenn der Kohlenstoff weitgehend herausgefrischt ist, nimmt die Entkohlungsgeschwindigkeit wieder ab [5].

Der Sauerstoffgehalt der Metallschmelze am Ende des Blasvorgangs, ist in erster Linie vom Restkohlenstoffgehalt abhängig. Der Kurvenverlauf in Abb. 3, aus [4] zeigt den Zusammenhang zwischen dem Kohlenstoff- und Sauerstoffgehalt im Gleichgewicht bei einem CO- Partialdruck von 1 bzw. von 0,1 [bar].



**Abb. 3:** Sauerstoffgehalt, Sauerstoffnutzungsgrad und FeO- Gehalt als Funktion des Kohlenstoffgehalts im Gleichgewicht bei einem CO- Partialdruck von 1 bzw. 0,1 bar, aus [4].

Wie in Abb. 3. gezeigt liegt der Kohlenstoffgehalt bei einem durchschnittlichen LD-Prozesses und bei einem CO- Partialdruck von 1 bzw. 0,1 bar in der Regel im Bereich zwischen 0,02 und 0,04 Gewichts % der Metallschmelze. Der Sauerstoffgehalt liegt dabei zwischen 0,06 bis 0,13 %. Die Gleichgewichtswerte des Kohlen- und Sauerstoffs in der Metallschmelze können durch ein intensives Nachspülen durch das Inertgas nach Blasende verändert werden [4]. Wie Abb. 3 (rechts) zeigt, kann bei einem CO-Partialdruck von 1 bar, der Kohlenstoff theoretisch bis 0.013% des Gewichts gefrischt werden [4]. Ab diesem Wert wird nur noch Eisen oxidiert, Abb.4.



**Abb. 4:** Zusammenhang zwischen Kohlenstoff- und Sauerstoffgehalt nach einer Inertgasspülung im Konverter, Parameter in den Kurven ist der Druck, aus [4].



Um Sauerstoffnutzgrad und Eisenverluste niedrig zu halten, wird heute meistens, mit der geringster möglichen Schlackenmenge und mit einer intensiven Inertgaspülung gearbeitet. Der Blasprozess wird bei etwa 0.04 % C beendet. Aus Kapazitäts- und Kostengründen wird die Feinentkohlung heute nicht mehr im Konverter sondern erst in der Pflanze, z. B. mit dem RH- Verfahren (**Ruhrstahl-Heraeus**) durchgeführt [4].

### 2.1.4 Einstellung des Stickstoffgehaltes

Die Einstellung des Stickstoffgehaltes muss hier in Verbindung mit dem Bodenspülen der Schmelze angesprochen werden. „Unter der Voraussetzung niedriger Stickstoffgehalte in den Einsatzstoffen und im Blassauerstoff, sowie einer Argonbodenspülung während des Blasprozesses können zu Blasende Stickstoffgehalte von 20 ppm erreicht werden. Durch Stickstoffspülen können aber auch gezielt höhere Stickstoffgehalte eingestellt werden [4]“. Wie Abb. 5. zeigt, kann man während der Blasezeit von Stickstoffspülung auf Argonspülung bis Blasende umschalten und damit niedrige Stickstoffgehalte in der Metallschmelze einstellen. Wird z.B. bei 75 % der Stickstoffblasezeit auf Argon umgeschaltet, so können abhängig von der Spülgasrate Stickstoffgehalte bis 40 ppm eingestellt werden. Durch Nachspülen kann, wie im Abb. 5 (rechts) dargestellt, ausgehend von diesen Gehalten der Stickstoff um noch 20 % erhöht werden. Eine Verringerung des Stickstoffgehaltes durch Argonnachspülen ist hingegen mit den üblichen Spülgasraten nicht mehr möglich [4].

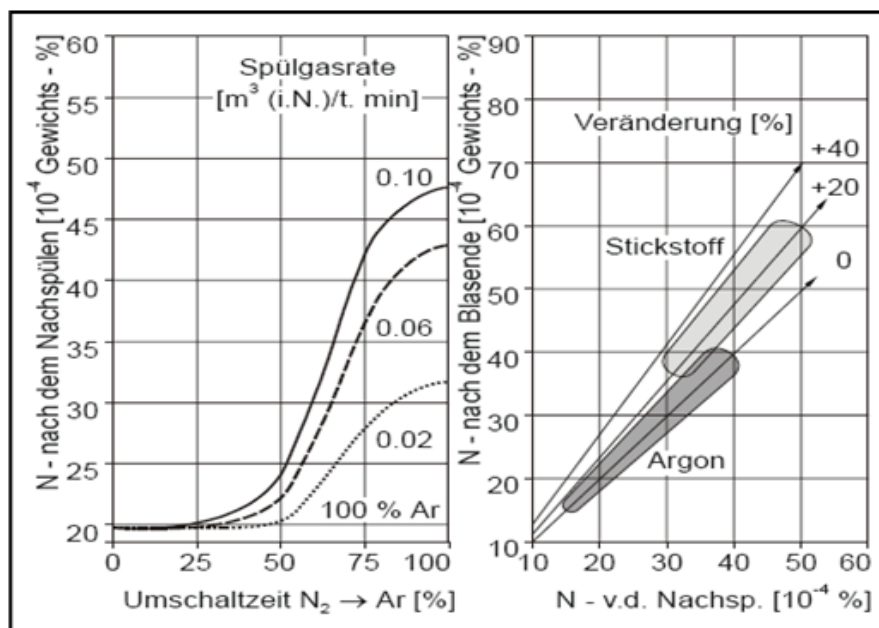



Abb. 5: Stickstoff-Gehalte in Abhängigkeit der Spülbedingungen im Konverter, aus [4].



<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik Montanauniversität A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH) Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	--

### 2.1.5 Entphosphorung der Metallschmelze

Eine weitere Aufgabe des Frischprozesses im Konverter ist die Absenkung der Phosphorgehalte. Wie in Abb. 2. gezeigt läuft die Entphosphorung hauptsächlich in der ersten Blashälfte ab [4]. Voraussetzungen für eine gute Entphosphorung sind hohe FeO- und CaO-Aktivitäten der Schlacke, niedrige Badtemperaturen, gute Durchmischung und eine möglichst große Phasengrenzfläche zwischen Metall- und Schlackenphase [5].

„Bei der Phasengrenzreaktion Metall-Schlacke bilden sich unter Beteiligung des gelösten Sauerstoffs in der Schmelze und der freien Sauerstoffanionen in der Schlacke die Anionenkomplexe des Phosphors, welche dann mit saurerer Schlacke (wegen Siliziumanteil) komplexe Ketten bilden“ [5]. Dies erklärt, warum der größte Teil des Phosphors schon in der ersten Blashälfte in der Schlacke festgehalten wird, obwohl die Basizität (Verhältnis der Gewichtsanteile von basischen zu sauren Bestandteilen, z.B. von CaO / SiO<sub>2</sub>) höchstens 1.5 erreicht.

Um die Entphosphorung möglichst frühzeitig zu ermöglichen wird in der Praxis durch Veränderung der Blasparameter gezielt auf eine rasche Schlackenbildung hingearbeitet.

### 2.1.6 Schlackenbildung beim LD- Verfahren

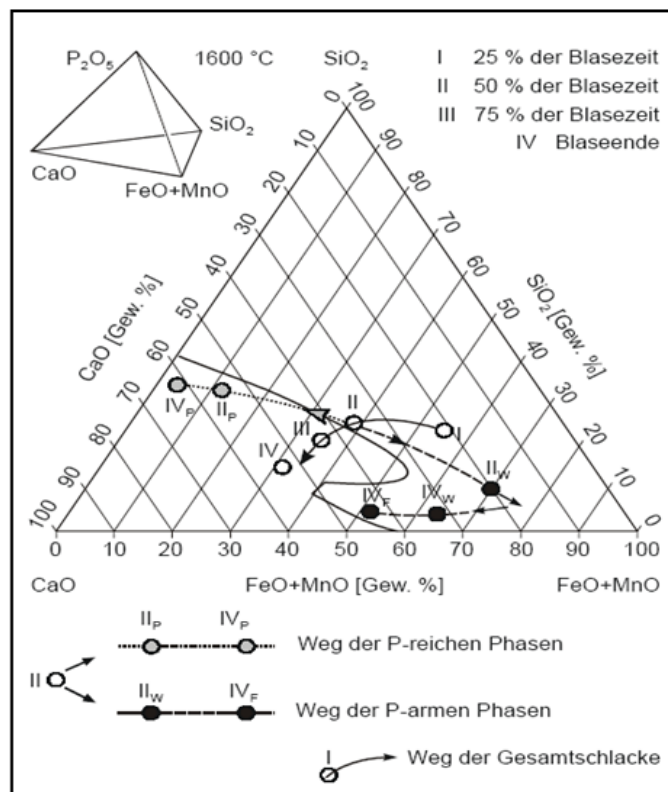
Die drei Hauptkomponenten der Konverterschlacke sind die Oxide CaO, SiO<sub>2</sub> und FeO. Diese drei Oxide machen in Summe ca. 85% der Schlackenzusammensetzung aus [5]. Der Sauerstoffstrahl aus der Sauerstoffflanze zerreißt die Metallschmelze an der Grenzfläche in viele winzige Tröpfchen, die in die Schlacke eingebaut werden. Die intensive CO-Entwicklung in der Schmelze und die Oxidation des Kohlenstoffs in den hochgeschleuderten Tröpfchen halten die Schlacke schaumig. Es bildet sich dabei die für das LD-Verfahren charakteristische „Schlackenemulsion“, die aus Schlacken- und Eisentröpfchen besteht und von Gasblasen durchsetzt ist [4].

In der Literatur wird das „Dreiphasensystem“ (FeO, CaO und SiO<sub>2</sub>) genauer analysiert. Aus [4] ist zu entnehmen: „Dieses Dreiphasensystem mit seiner großen Oberfläche und den hohen Massenübergängen ist ausschlaggebend für den raschen Prozessablauf. Der Anteil der Reaktionen in der Emulsion an der Gesamtentkohlung beträgt in dieser Blasphase etwa 75 % und nimmt noch weiter zu. Im zweiten Viertel der Blasezeit wird das Maximum der Entkohlungsgeschwindigkeit erreicht. Auch der emulgierte Schmelzenanteil weist hier sein Maximum auf. Dies verursacht auch die größte Höhe der Schaumslagge im Konverter. Diese Periode ist durch ein Ansteigen des Schlackengewichts bis auf das Doppelte des Ausgangsgewichts gekennzeichnet. Das bedeutet, dass der Transport von Eisen aus der Schmelze in die Schlacke größer ist, als jener von der Schlacke in die Schmelze. Eisentröpfchen werden in der Emulsion festgehalten, oxidiert und zum Teil als FeO in die Schlacke eingebaut. Für den Grad der Entkohlung ist die Verweilzeit der Tröpfchen in der Schlacke entscheidend.




Im dritten Blasviertel nimmt die Entkohlungsgeschwindigkeit langsam ab. Die Schlacke wird durch Bildung von Dicalciumsilikat heterogen. Mangan und Phosphor werden teilweise aus der Schlacke in die Schmelze reduziert. Im letzten Viertel wird die Entkohlungsgeschwindigkeit durch Verarmung der Schmelze an Kohlenstoff geringer. Durch das unverminderte Sauerstoffangebot verschlackt mehr Eisen und auch wieder Mangan, daher nimmt das Schlackengewicht weiter zu. In dieser Periode ist die Rührwirkung des Inertgases, das durch den Boden eingeblasen wird, besonders wichtig. Es erhöht den Stofftransport, senkt den CO-Partialdruck und fördert dadurch die weitere Entkohlung der Schmelze“ [4].

Durch systematische Betriebs- und Laborversuche hat man weitreichende Erkenntnisse über die Verschlackung und Abbindung des Phosphors gewonnen, die eine optimierte Schlackenführung im LD-Prozess ermöglichen. Aus Schlackenproben, die während des Blasens und zu Blasende aus dem Konverter entnommen wurden, lassen sich der Schlackenweg und die Rolle einzelner Schlackenkomponenten darstellen. Durch Einordnung aller Oxidkonzentrationen in das bekannte Vierstoffsystem, (CaO)-(FeO)-(SiO<sub>2</sub>)-(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) bei 1600 °C, über ein weiteres Rechnerprogramm, werden die einzelnen Schlackenphasen bestimmt und zu einem Gesamtbild zusammengestellt, wie es im Abb. 6 (aus [4]) in der sogenannten „Phase Map“ zu sehen ist.



**Abb. 6:** Veränderung der Schlacke während des Blasprozesses im Quasi- Vierstoffsystem (CaO)- (FeO+ MnO)- (SiO<sub>2</sub>)-(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), aus [4].



<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik Montanauniversität A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH) Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	---

Auf Grund dieser Erkenntnisse geht die Schlackenführung heute von niedrigeren Kalkzusätzen aus, und die Kalksättigung wird nicht mehr als Ziel vorgegeben. Wichtig ist eine möglichst schnelle Kalkauflösung und die rechtzeitige Bildung des Dicalciumsilikats, welche die stabile Einbindung des Phosphors und möglichst niedrige freie Kalkgehalte zu Blasende gewährleistet. Dies ist auch wichtig für die weitere Schlackenverwertung.

In den europäischen LD-Stahlwerken wird heute ein maximaler Schrotteinsatz angestrebt. Deshalb ist auch Silizium im Roheisen als Energiespender erwünscht. Dadurch ergeben sich heute Kalksätze um 40 kg/t und Schlackenmengen um 90 kg/t [4]. In Japan wird dagegen meist eine umfassende Roheisenvorbehandlung durchgeführt. Dadurch können nur mehr geringe Schrottmengen zugesetzt werden, welche die Wärmebilanz mit entsiliziertem und entphosphortem Roheisen zulässt. Im Konverter wird nur noch die Entkohlung durchgeführt, wodurch sehr geringe Kalk- und Schlackenmengen möglich werden. Dieser Weg garantiert vom Einsatz her auch die geringsten Mengen an unerwünschten Spurenelementen. Welcher Weg unter den gegebenen Umständen sinnvoll ist, entscheidet die Wirtschaftlichkeit. Die europäischen Stahlwerke haben jedenfalls gezeigt, dass es auch bei maximalem Schrottrecycling ohne Roheisenentphosphorung möglich ist, Phosphorgehalte unter 0.010 % einzustellen [4].


### **2.1.7 Entschwefelung der Metallschmelze**

Die Entschwefelung ist im LD-Prozess besonders beim Einsatz von entschwefeltem Roheisen relativ gering. Durch den sich auflösenden Schrott wird laufend Schwefel in die Schmelze nachgeliefert, sodass bis drei Viertel der Blasezeit eine Schwefelzunahme beobachtet werden kann. Erst im letzten Viertel erfolgt eine merkbare Entschwefelung. Sobald der Endkohlenstoff und die gewünschte Temperatur erreicht ist, wird der Sauerstoff abgeschaltet und die Lanze ausgefahren [4].

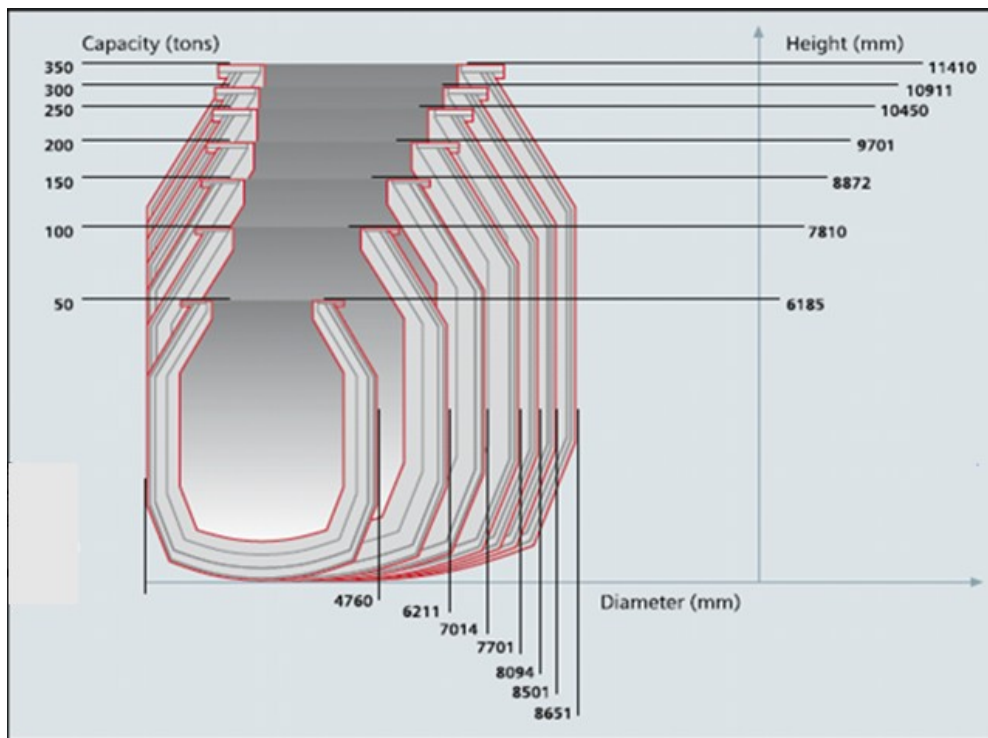
## **2.2 Auslegung und Form des Konverters und der Lanze beim LD-Verfahren**

### **2.2.1 Konvertertiegel**

Der erste Entwurf des Konvertertiegels basierte mehr auf „künstlerischen“ Vorstellungen als auf wissenschaftlichen Ideen. Heutzutage wird das Design des Konverters den gegebenen betrieblichen Anforderungen des LD- Prozesses durch Modellrechnungen angepasst. Diese beziehen sich im Wesentlichen auf die Kapazität des Konverters, seine Feuerfestausmauerung, das Handling, das Reaktionsvolumen und die Position der Sauerstofflanze im Bezug zum Stahlbad. Wie im Abb. 7. (aus [6]) dargestellt haben sich folgende Prinzipien etabliert:

<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik Montanauniversität A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH) Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	--

- Der Winkel der Düsen im Lanzenkopf soll  $10 - 20^\circ$  zur senkrechten Position zum Stahlbad betragen (der Winkel ist eine wichtige Größe bei der Optimierung des Prozesses) und die Düsen sollen symmetrisch zur Achse der Lanze bzw. zum Sauerstoffstrahl positioniert werden.
- Der zentrale Teil des Tiegels soll eine zylindrische Form und der obere Teil die Form eines beschnittenen Kegels aufweisen.
- Zwischen der Oberfläche des Schmelzbades und dem Tiegelmund soll der Abstand etwa das Doppelte der Tiefe des Schmelzbades betragen.
- Der untere Bereich des Konverters soll sich verengen, um eine hinreichende Badtiefe zu gewährleisten [6].



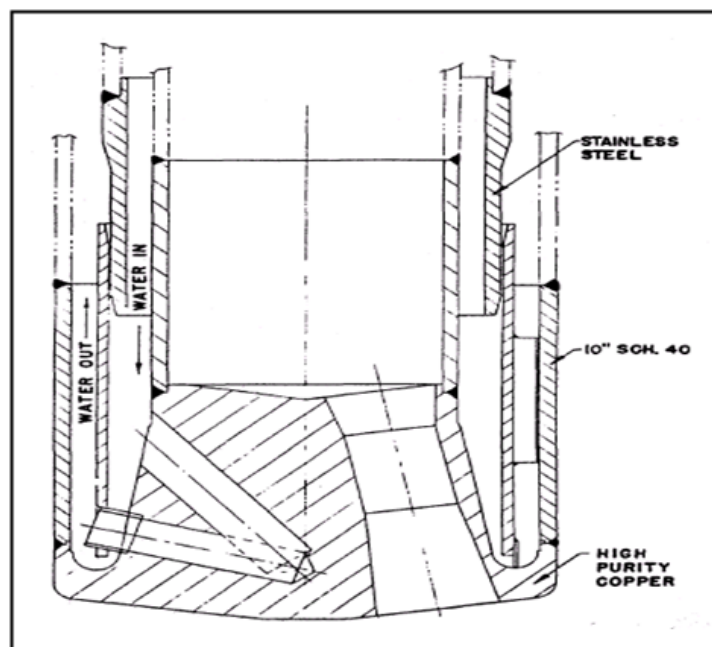
**Abb. 7:** Geometrie und Größe von Konvertertiegeln, aus [6].

Die meist basische (Magnesia oder Dolomit) Feuerfestausmauerung des Konverters spielt beim Prozess eine wichtige Rolle. Die feuerfesten Werkstoffe verschleßen durch eine Vielzahl von Einflussgrößen, wie beispielsweise durch die hohen Temperaturen, die Temperaturwechsel, den thermomechanischen Angriff, sowie durch Reaktionen mit gasförmigen, flüssigen oder festen Stoffen aus dem Ofenraum. Das Feuerfestmaterial besteht aus mehreren Phasen aus hoch schmelzenden Oxiden, Poren und Bindemitteln, wobei sich letztere durch die Temperatureinwirkung noch verändern.



### 2.2.2 Sauerstofflanze

Die Sauerstofflanze hat sich - je nach Konverterform und Größe - von der Einlochdüse zur Mehrlochdüse weiterentwickelt. Die im [10] beschriebene Erfindung „Sauerstofflanzen mit im Lanzenkopf integrierten Lavaldüsen zum Einblasen von Sauerstoff in metallurgische Behälter zur Stahlerzeugung“, betrifft eine ausfahrbare Sauerstofflanze, die von ihrer Startposition aus in den Konverter bis knapp über der Schmelzbadoberfläche abgesenkt wird. Mit der Lanze wird durch die im Lanzenkopf integrierten Lavaldüsen Sauerstoff mit hoher Geschwindigkeit auf die Schmelze geblasen. „Der Sauerstoff wird am oberen Ende der Lanze zugeführt. Er trifft auf die Schmelzenoberfläche mit einer so hohen Energie auf, dass sich in der Oberfläche der Schmelze ein Krater bildet“ [7]. Heutzutage werden Sauerstofflanzen meist mit daran angeschweißtem Lanzenköpfen in der Regel mit mehreren Lavaldüsen, wie im Abb. 8 gezeigt, verwendet [7]. Diese Lanze besteht im Wesentlichen aus einem dicken, zentralen Rohr aus rostfreiem Stahl für die Sauerstoffzufuhr, welches mit einem Zweirohrsystem aus Stahl, durchflossen mit Kühlwasser (Temperatur:  $< 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , Menge:  $175\text{--}250\text{ m}^3/\text{h}$ ) ummantelt ist. Die Lanze wird durch ein Schnellwechselsystem an die Wasser- und Sauerstoffversorgung aus den Betriebsleitungen angekoppelt. Am anderen Ende der Lanze ist ein Lanzenkopf aus einer Kupferlegierung an die Lanze angeschweißt, siehe Abb. 8 und Abb. 9, aus [7].



**Abb. 8:** Lanzenkopf aus einer Kupferlegierung mit sechs Lavaldüsen, aus [7].

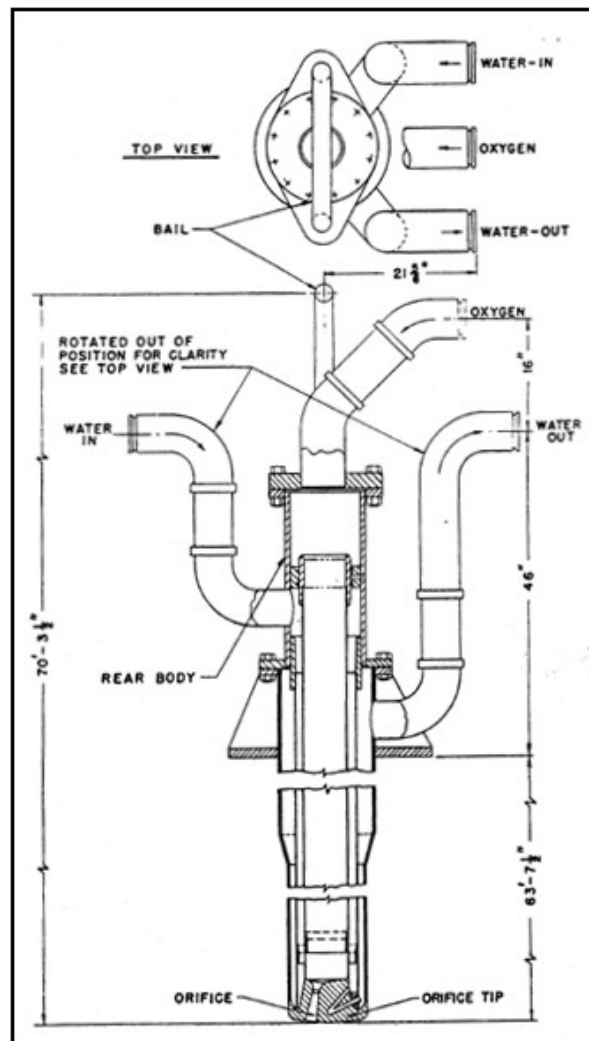

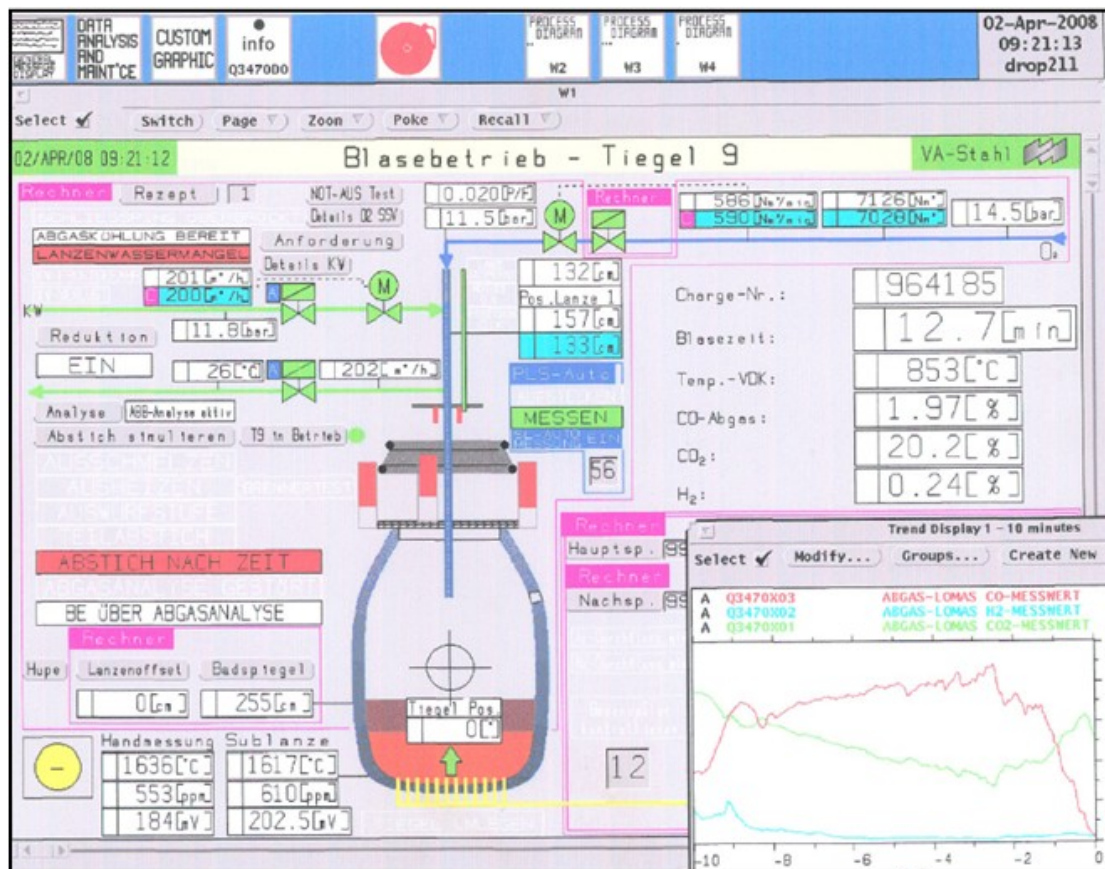


Abb. 9: Sauerstofflanze mit Wasser- und Sauerstoffversorgung, aus [7].

### 2.2.3 Lanzenkopf

Auf Basis der Kundendaten (siehe Abb. 10. [11]) werden zunächst die Anzahl der Düsen (4, 5 oder 6) im Lanzenkopf festgelegt. Die Position und Neigung der Düsen wird nach strömungsmechanischen Kriterien festgelegt, weil diese Parameter einen wesentlichen Einfluss auf den Wirkungsgrad eines Lanzenkopfes haben. Zu den stahlwerksspezifischen Daten gehören dabei insbesondere Konverterinhalt und seine Abmessungen, Badhöhe, Sauerstoffmenge und Druck, sowie die Kühlwassermenge und der Kühlwasserdruck. Auf dieser Datenbasis erfolgt die Berechnung mit Hilfe von kommerziellen EDV- Programmen vollautomatisch, Abb. 11 [12].

<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik Montanauniversität A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH) Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	--

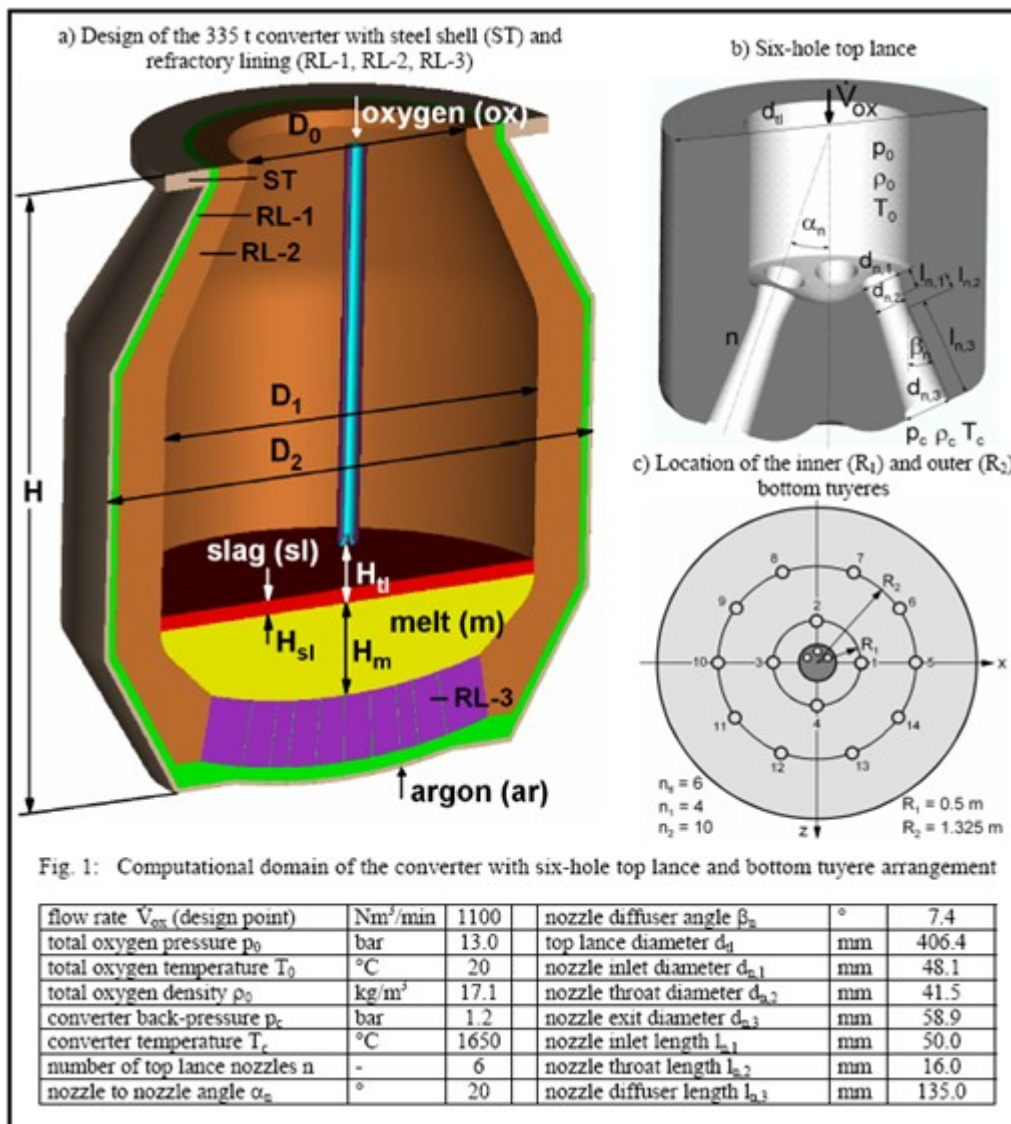


**Abb. 10:** Beispiel für die Darstellung der Betriebsdaten in einem Stahlwerk (150 t Konverter der Voestalpine Stahl AG Linz, [11]).

Zur Erzielung der möglichst effizienten Kühlung des Lanzenkopfes wird besonderer Wert auf die Gestaltung der wasserführenden Bereiche gelegt. Die Strömungsgeschwindigkeit und die Wege des Kühlwassers sind dabei die entscheidenden Stellgrößen. Der Lanzenkopf wird innenseitig einem hohen Druck sowie hohen Sauerstoffgeschwindigkeiten ausgesetzt. Dies erfordert in den Lavaldüsen absolut glatte Oberflächen und geometrisch optimierte Konturen und Kanten. Außenseitig wirken auf den Kopf die Strahlungshitze sowie die aufgeschäumte Schlacke ein. Diesen Anforderungen ist der Kopf während des Prozesses bis zu 20 Minuten lang ausgesetzt. Bei exakt ausgelegtem Kühlsystem und optimalen Prozessbedingungen können die Blaslanzenköpfe bis zum Auftreten der ersten Undichtigkeit im Kühlsystem eine Lebensdauer von bis zu 150 Chargen erreichen.

Die Standzeit eines Lanzenkopfes ist nicht das einzige Kriterium zur seiner Beurteilung. Entscheidend für die Metallurgie der Stahlherstellung ist, dass die erforderliche Sauerstoffmenge über die Düsenaustrittsöffnungen möglichst optimal mit der Metallschmelze in Berührung gebracht wird.






**Abb. 11:** Beispiel für Auslegedaten für die Berechnung eines Lanzenkopfes bzw. des Anzahl und Geometrie der Lavaldüsen. Die Dimension des Konverters, Badhöhe, Schlackenhöhe und Verschleiß der Ausmauerung spielen bei den Überlegungen eine wesentliche Rolle; aus [12].

## 2.2.4 Fahrweise und Position der Lanze im Konverter

Unter der „Fahrweise“ der Sauerstofflanze wird in dieser Arbeit verstanden, wie schnell und wie oft die Lanze nieder- und hochgefahren wird, und in welchen Positionen diese wie lange sie gehalten wird. Dies wurde lange Zeit fast ausschließlich als konstruktives Problem verstanden und kaum aus metallurgischer Sicht untersucht. Neuere Untersuchungen zu diesem Thema findet man in [13].

Durch Ihre robuste Konstruktion und die großen Menge an Kühlwasser wiegt eine typische sechs- Loch- Lanze für einen 150 t Konverter circa 5 Tonnen. Die Länge der Lanze (sie hängt

<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik Montanauniversität A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH) Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	--

vom Platzangebot im Stahlwerk ab) reicht von 20 m bis zu 32 m. Um die Lanze rasch und prozessgerecht manipulieren zu können, wird sie von einer eigens dafür gebauten Vorrichtung mechanisch unterstützt. Wie in [7] beschrieben wird die wassergekühlte Lanze nach dem Chargieren von Schrott und Roheisen mit der Hebevorrichtung aus der „Waiting Position“ in den Konverter heruntergefahren, siehe [7]. Die typische Geschwindigkeit beträgt dabei 20 km/h. Die Lanze durchläuft dabei den Ansaugkanal und wird zu Ihrer Erstposition oberhalb der Schmelze gebracht. Die Entfernung der Lanzenspitze zum Stahlbad ist nun am geringsten und beträgt circa 0,5 bis 1,4 m (bei einem 150 t Konverter). Dabei kann es vorkommen, dass die Lanze mit ihrem Kopf gegen den noch nicht untergetauchten, auf dem Roheisen schwimmenden Schrott stößt und zerstört wird. Das Kühlwasser strömt dann aus dem Lanzenkopf auf die bis zu 1500 °C heiße Metallschmelze, was zu einer Explosion und damit auch zur Gefährdung von Menschen führen kann.

In der Erstposition wird circa 2 bis 3 Minuten lang Sauerstoff auf die Metallschmelze geblasen. Danach wird die Lanze wieder hochgefahren und etwa 1,7 m über dem Niveau der Metallschmelze bis zum Blasende positioniert. Danach wird die Lanze wieder auf ihre Startposition (Waiting Position) hochgefahren und auf eventuelle Schäden inspiziert. In der Regel kommt es schon bei der ersten Charge zu einer bis zur 3 cm dicken Verbärung der Lanze. Dies führt zu einer starken Gewichtszunahme der Lanze.

Während die Sauerstofflanze in Startposition auf Umgebungstemperatur abkühlt, wird eine Probelanze zur Entnahme einer Probe ins Stahlbad gefahren. Entspricht die Probe nicht der gewünschten chemischen Zusammensetzung der Schmelze, so wird „nachgefrischt“ (nachgeblasen). Dazu muss die Sauerstoffblaslanze wieder abgesenkt werden. Das Nachblasen nimmt in den meisten Fällen einige Minuten in Anspruch. Ein Nachblasen kann auch erforderlich sein, um die Stahlschmelze bis zum Abstich auf Temperatur zu halten. Während der Konverter entladen bzw. neuchargiert wird, befindet sich die Sauerstofflanze entweder in der Waiting Position oder im Absaugungsschacht.

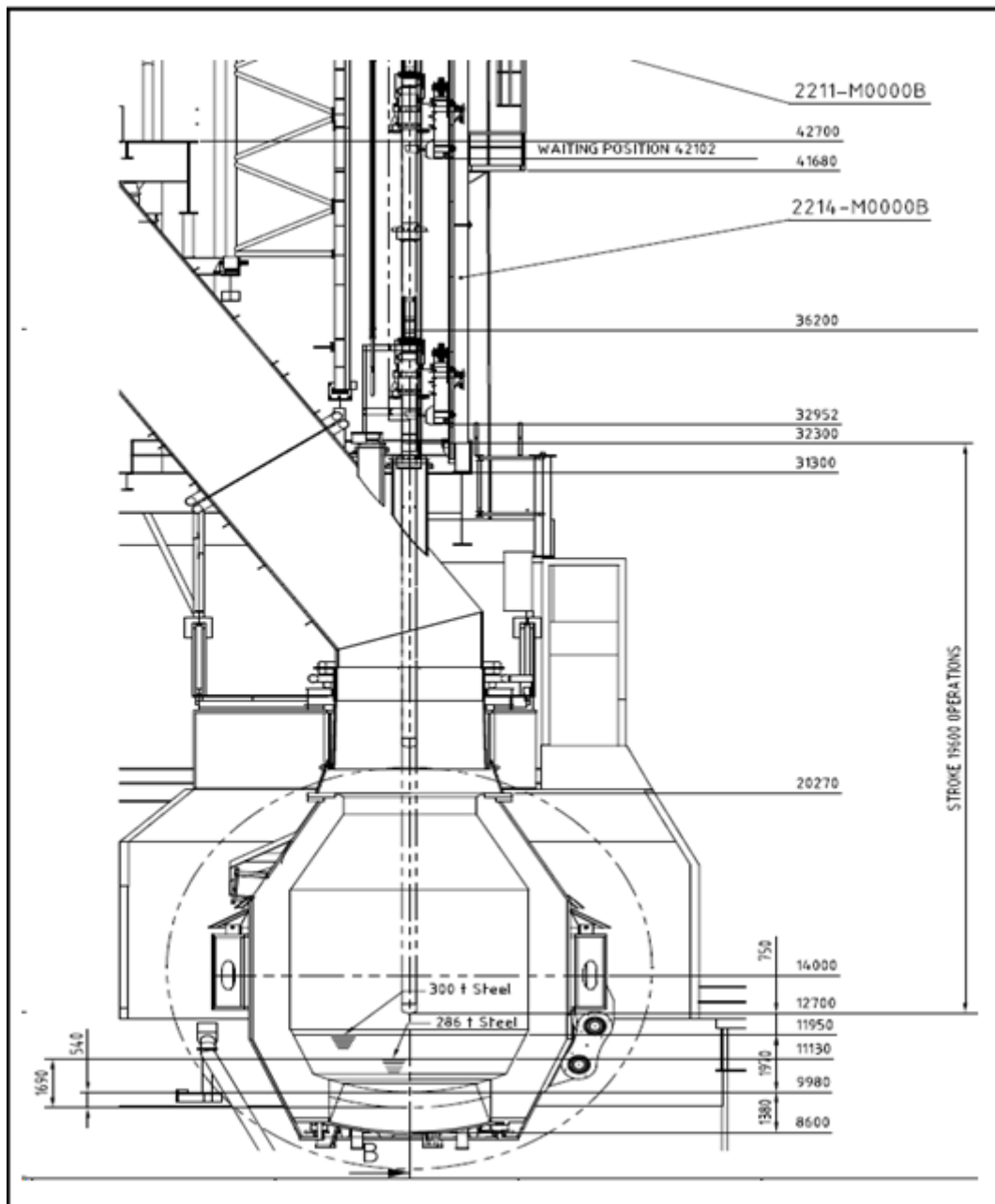



Abb. 12: Verschiedene Positionen der Lanze im Konverter, aus [7].

Seit einiger Zeit wird in vielen Stahlwerken als Verschleißschutz der Feuerfestausmauerung des Konverters das so genannte „slag splashing“ durchgeführt. Dabei wird die Sauerstofflanze wieder abgesenkt und mit kaltem Inertgas gespült. Durch den Gasdruck wird die im Konverter gebliebene Schlacke auf dem Feuerfestmaterial der Ausmauerung verteilt und schützt dieses in der Folge vor Verschleiß [8]. Form und Positionierung der Sauerstoffdüsen sowie die Sauerstoffmenge sind an die Konverterform angepasst. Die Konstruktionsparameter und die geblasene Sauerstoffmenge bleiben während der Frischvorgänge konstant und die



<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik Montanauniversität A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH) Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	--

Position der Lanze ist in jedem Prozess-Schritt festgelegt. Das Niveau der Metallschmelze hängt aber von den aktuellen Betriebsbedingungen und dem Zustand des Konverters ab. Niveauunterschiede resultieren aus unterschiedlichen Chargierungsmengen von Schrott und Roheisen oder auch aus der Badbewegung. Änderungen des Reaktionsvolumens des Konverters (und in Folge des Niveaus der Schmelze) werden durch Verschleiß der Feuerfestausmauerung und durch das häufig angewandte „slag splashing“ hervorgerufen [9]. Dies kann dazu führen, dass der Abstand zum Schmelzbad, auf den die Sauerstoffdüsen ausgelegt sind, nicht mehr eingehalten werden kann. Dann sind die Strömungs- und Druckverhältnisse anders als vorgesehen und der Prozess verläuft nicht optimal. Deswegen ist eine Steuerung der Prozessdynamik wünschenswert, welche auf die tatsächliche Positionierung der Lanze über der Schmelze Bezug nimmt. Eine dynamisch geregelte Lanzenpositionierung kann auch einen optimalen Betrieb der Lavaldüsen gewährleisten.

### 2.2.5 Lavaldüsen

Bei der Sauerstoffblaslanze bzw. im Lanzenkopf werden zum Aufblasen des Sauerstoffes auf die Metallschmelze die Düsen mit einer Lavalform verwendet. Diese Düsen wurden Ende des 19. Jahrhunderts von Carl Gustav Patrik de Laval entwickelt, um Dampfturbinen mit Dampf zu versorgen. Später wurde die Lavaldüse beispielsweise bei Überschallwindkanälen, Triebwerken von Flugzeugen und als Steurdüse für Satelliten genutzt.

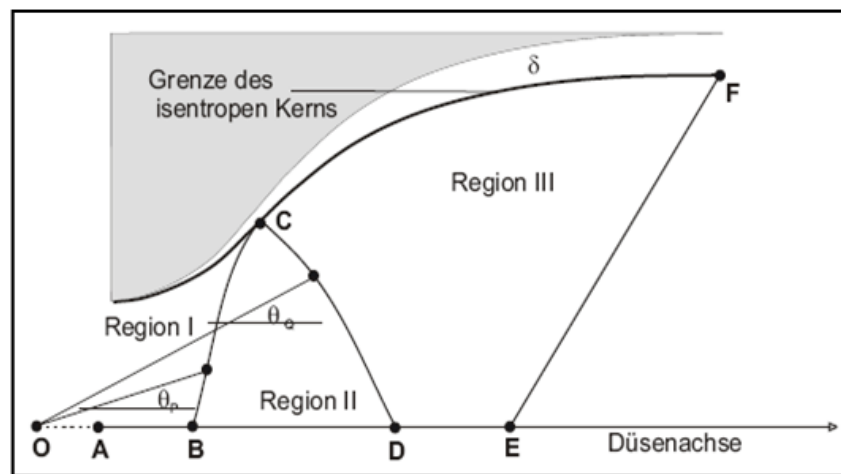
„Die Expansion des Gases durch eine Lavaldüse ermöglicht eine über mehr als zehn Düsendurchmesser konstante Machzahl nach dem Düsenausgang [14]. Dies ist einer der Gründe, warum man beim Frischvorgang eine Gasexpansion mit reinem Sauerstoff durchführt.

„Bei einer Strömung mit Überschallgeschwindigkeit können sich Störungen des Strömungsfeldes nicht gegen seine Flussrichtung ausbreiten, da sie sich mit der jeweils lokalen Schallgeschwindigkeit durch ein Strömungsfeld bewegen“ [15]. Dies ist für die Festlegung der Form der Düse (Wandkontur) sehr wichtig.

Allgemein sollte eine Überschalldüse eine konvergent- divergente Form besitzen. Eine Lavaldüse ist in gewisser Weise eine triviale Möglichkeit, Gase auf Überschallgeschwindigkeit zu beschleunigen. Die Geschwindigkeit im Gasstrahl (Machzahl) wächst bei Lavaldüsen mit dem Abstand zur Düse an, so dass Dichte und Temperatur abfallen. Die besonderen Eigenschaften bei der Gasexpansion durch eine Lavaldüse werden unter anderem durch ihre spezielle Wandkontur erreicht. Daher wird die Ermittlung der Wandkontur im Folgenden besprochen. Wie im oben erwähnt hat eine Überschalldüse generell eine konvergent-divergente Form. Im konvergenten Teil wird das Gas aus dem Stillstand auf Mach 1 beschleunigt. Für die Qualität der Strömung hinter der Düse ist vor allem der divergente Teil der Düse wichtig. Die Geschwindigkeit senkrecht zur Strahlachse soll möglichst konstant




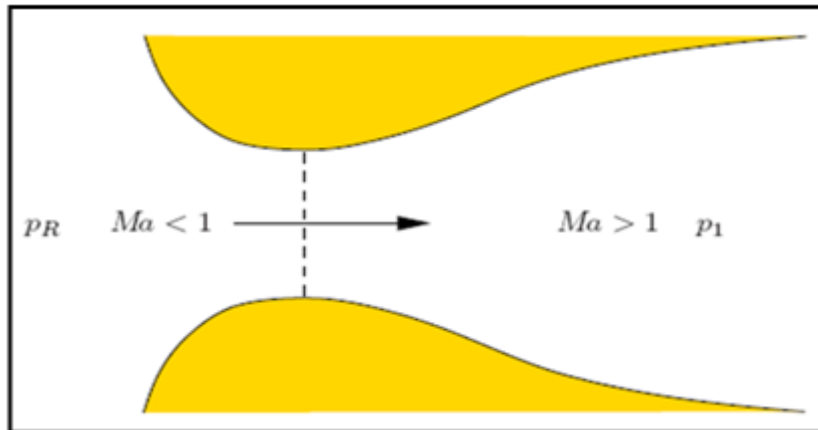
sein. Die Dicke der Grenzschicht, die sich durch die Viskosität des Gases an der Wand ausbildet, soll gering gehalten werden. Daraus ergibt sich, dass der konvergente Teil im Vergleich zum divergenten Teil möglichst kurz sein sollte. Ein stetiger Übergang der Kontur zwischen den beiden Teilen ist ebenfalls sehr wichtig, um ein Abreißen der Strömung von der Wand zu vermeiden. In der Praxis hat sich eine hyperbolische Form des konvergenten Teils bewährt, die mit geringer Steigung zum Düsenhals hin ausläuft. Siehe Abb.13, nach [15].



**Abb. 13:** Eine hyperbolische Form des konvergenten Teils (Region I) und ein stetiger Übergang (Punkt C) der Kontur zum divergenten Teil (Region III) einer Lavaldüse haben sich in der Praxis bewährt, um ein Abreißen der Strömung von der Wand zu vermeiden, aus [15].

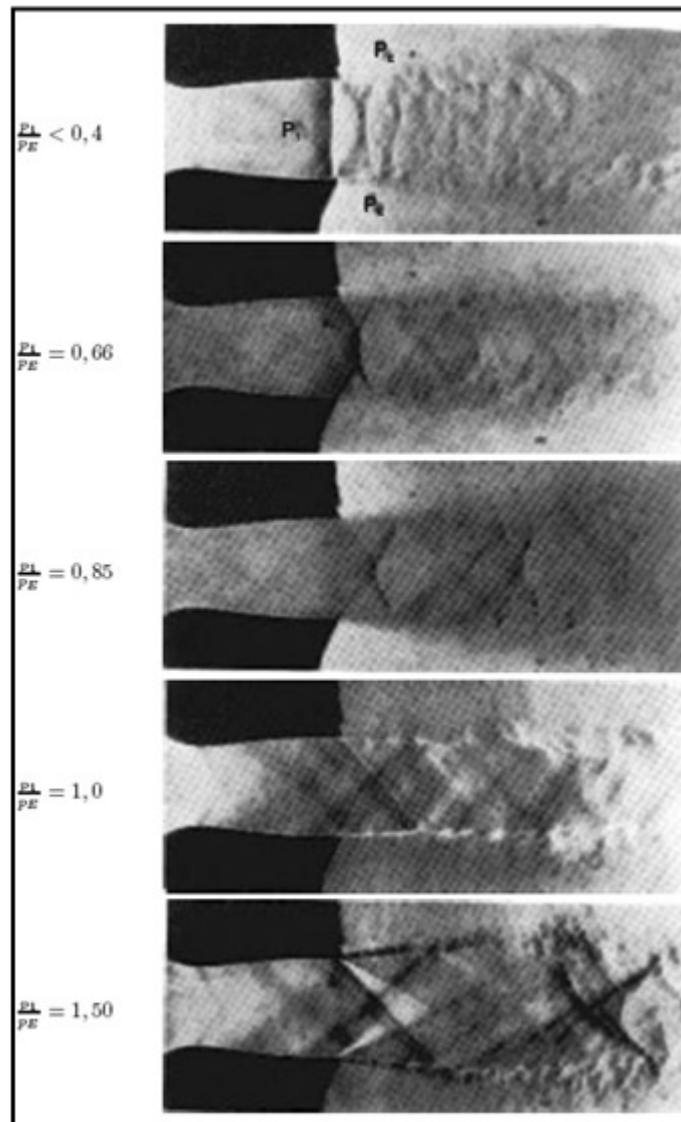
Im divergenten Teil wird die Strömung von Mach 1 auf die maximale Geschwindigkeit beschleunigt. Dies bedingt eine S-förmige Wandkontur. Die Beschleunigung erzeugt Expansionswellen, die den Ausgang der Düse allerdings nicht überschreiten dürfen, um eine konstante Machzahl zu gewährleisten. Die strömungsmechanischen Rechnungen werden hier nicht vorgeführt. Ein Ergebnis ist in Abb. 14 aus [15] beispielhaft dargestellt.

<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik Montanauniversität A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH) Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	---



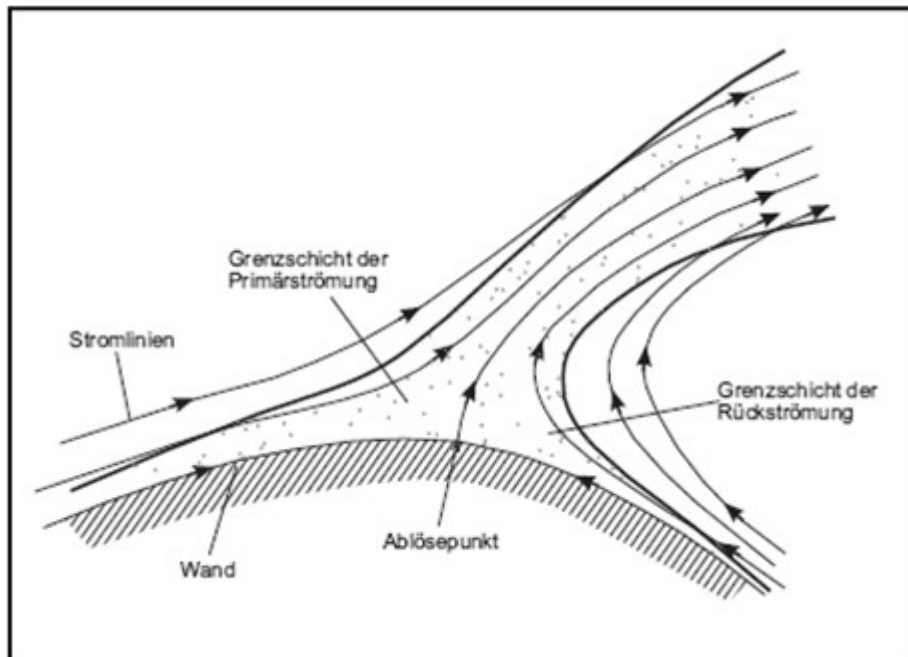
**Abb. 14:** Innenform einer Lavaldüse und Werte der Machzahlen, nach [15].

Wie schon im Zusammenhang mit der Stahlherstellung beschrieben sind die Prozessparameter großen zeitlichen Veränderungen unterworfen. Dies trifft insbesondere auch auf das Verhältnis zwischen dem Sauerstoffdruck in der Düse ( $P_1$ ) und dem Gesamtdruck in der Umgebung ( $P_E$ ) zu. Dies führt zur unterschiedlichen Gasströmungen aus der Düse. In Abb. 15. sind unterschiedliche Gasströmungen aus einer Lavaldüse dargestellt [15].



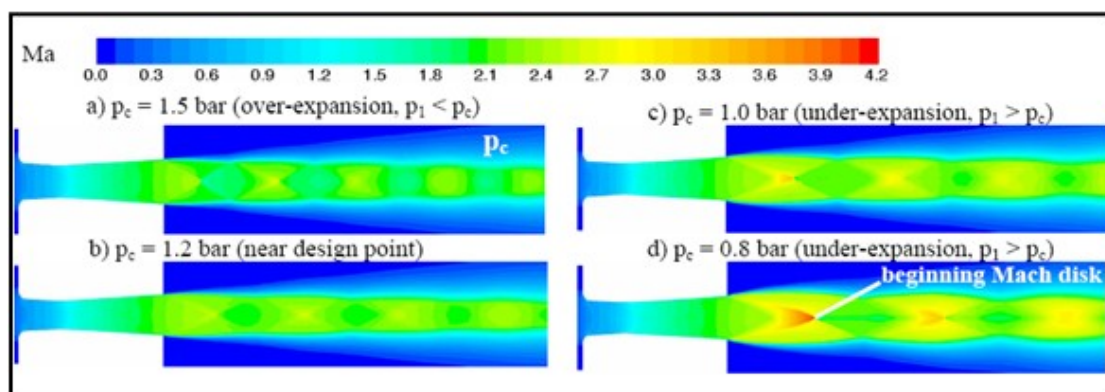
**Abb. 15:** Darstellung der Strömung aus einer Lavaldüse in Abhängigkeit vom Verhältnis Innendruck ( $P_1$ ) zu Außendruck ( $P_E$ ). Eine optimale Expansion des Gases wird beim Verhältnis von  $P_1/P_E = 1$  erreicht. In der Praxis treten aber die ungleichmäßigen Verhältnisse der Drücke  $P_1$  und  $P_E$  häufiger auf. Dabei verändert sich der Strahlquerschnitt bzw. seine Geschwindigkeit, aus [15].

Wie in der Abb. 13 zu sehen neigen die Gase in Grenzschichten von Strömungen mit Druckanstieg zur Ablösung von der Düsenwand. Diese Gefahr ist bei Lavaldüsen besonders groß. Dabei entsteht an den Düsenkanten ein Unterdruck wodurch Rückströmungen erzeugt werden. Dadurch können heiße Gase und andere Medien (Schlacke, Stahl...) aus der Umgebung in die Düse gesaugt werden. Bereits sehr kleine Mengen dieser Umgebungsmedien können einen erheblichen Verschleiß der Düsenkanten verursachen (siehe Abb. 16, aus [15]).



**Abb. 16:** Qualitative Darstellung einer Grenzschichtablösung einer Primärströmung des Gases und Bildung einer Grenzschicht der Rückströmung an einer Düsenkante, aus [15].

Die Beschleunigung und Expansion der Gase in Lavaldüsen kann man mit Hilfe von Simulationsrechnungen ermittelt und dann auch optisch dargestellt werden. In der Praxis der Stahlherstellung kann es in Abhängigkeit vor der Position der Lanze zum Stahlbad zu verschiedenen Situationen kommen. Erwünscht dabei ist eine nahezu konstante Strömung der Gase, wie sie in Abb. 17, Teil b, dargestellt ist [12].



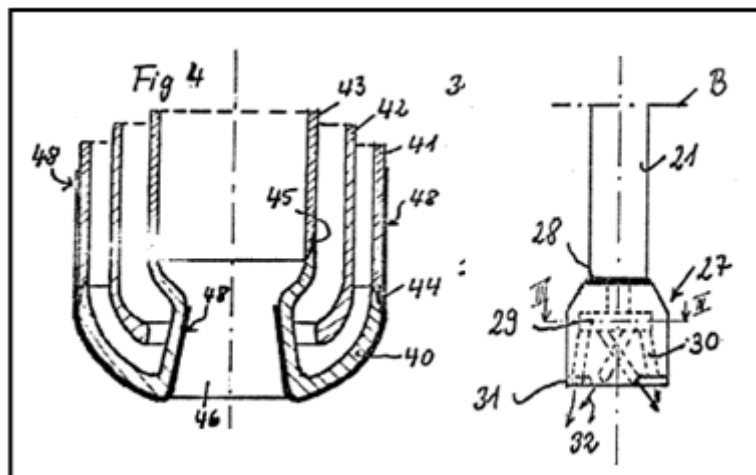
**Abb. 17:** Simulation der Strömungen von Lavaldüsen bei verschiedenen Druckverhältnissen während eines LD-Prozesses. Eine optimale Expansion des Gases wird beim  $P_c = 1.2$  erreicht, aus [12].



### 2.2.6 Patente für neue Lanzenkopfe

In den 50 Jahren seit der Erfindung des LD- Verfahrens sind zahlreiche konstruktive Vorschläge zur Optimierung der Lanze bzw. Lanzenkopfes veröffentlicht worden, Angestrebt wurden die Vergleichmäßigung der Lebensdauer bzw. eine Erhöhung auf mindestens 200 Chargen, höhere betriebliche Effizienz durch Konstanthalten der Strömungsverhältnisse über einen längeren Zeitraum, Verhinderung des Durchbrennens der Unterseite des Lanzenkopfes, Einbau von Sensoren zur Prozesstemperaturmessung, Miteinblasen von Kalk, Staub und anderen Medien in die Schmelze, sowie niedrige Materialkosten der Komponenten. Wie später ausführlich beschrieben, ist ein wesentlicher Aspekt zum Erreichen dieser Ziele die Verringerung (noch besser Vermeidung) der Wasserkühlung. Dies ist nur bei Verwendung hochtemperaturbeständiger Werkstoffe im Lanzenkopf möglich. Daher wird in den Patentschriften auch immer wieder der Einsatz von Keramiken angedacht. In diesem Kapitel wird ein Überblick über die wichtigsten Patente zu diesem Thema gegeben.

In Offenlegungsschrift Nr.: 2057568 [16] wird eine „Vorrichtung zum Einblasen von Gasen in Metallschmelzen und Verfahren zu ihrer Herstellung und ihre Verwendung“ (Abb. 18, aus [16]) beschrieben. Dabei soll eine mit Keramik beschichtete Lanze ins Stahlbad eingetaucht werden und dann durch das Einblasen von Sauerstoff ins Rotieren kommen. Nachteile dieser Idee sind vor allem die komplizierte Konstruktion im Bezug der Sauerstoff- und Wasserzuleitungen im flüssigen Stahlbad, sowie ihre ungenügende Dichtheit. Außerdem wird bei diesem Verfahren zu wenig der prozessnotwendigen Schlacke produziert

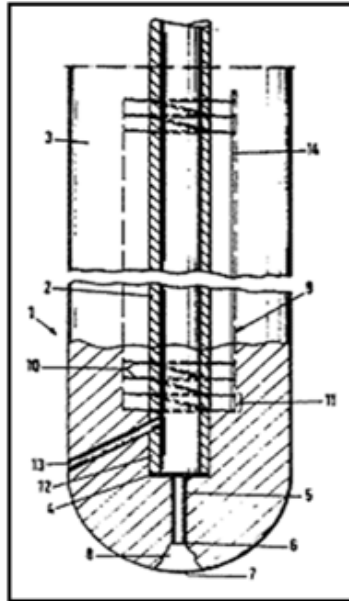


**Abb. 18:** Mit Keramik beschichtete Lanze, die ins Stahlbad eingetaucht wird und durch das Einblasen von Sauerstoff ins Rotieren kommt, aus [16].

In Offenlegungsschrift Nr.: EP0261365 [17] ist eine Tauchlanze, bei welcher das metallische Innenrohr von einem keramischen Schutzmantel umgeben ist, beschrieben (Abb. 19 aus [17]).

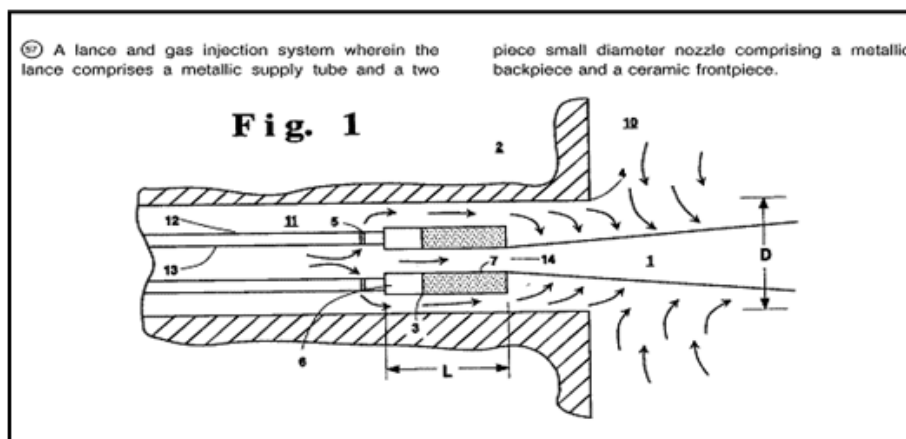


Bei der Beschreibung der Funktionen der Tauchlanze werden meistens Inertgase als Behandlungsmedium angegeben. Somit ist sie eher eine Spüllanze als eine Sauerstofflanze. Spüllanzen werden in der Sekundärmetallurgie bei den Pfannenöfen zum Einspülen von Inertgasen in die Stahlschmelze verwendet.



**Abb. 19:** Tauchlanze zum Einbringen von Behandlungsmedien in die Metallschmelze. Das metallische Innenrohr ist von einem keramischen Schutzmantel umgeben, aus [15].

Das Schutzrecht EP0571984 [18] beschreibt eine Blaselanze, bei welcher eine oder mehrere zweiteilige Düsen verwendet werden. Der Basisteil der Düsen besteht aus Metall, der Frontteil (Nr. 7 in Abb. 20) aus einem keramischen Werkstoff. Die Düsen können auch durch einen Gasstrom ummantelt (geschützt) werden, Abb. 20 aus [18].



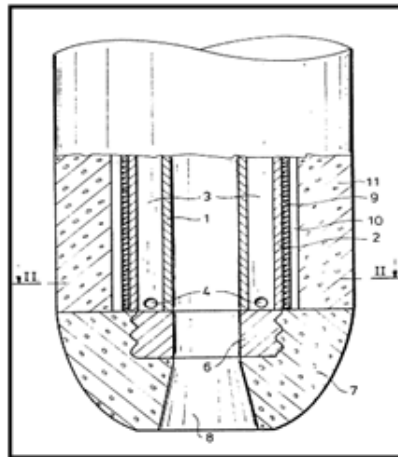
**Abb. 20:** Blaselanze, bei welcher eine oder mehrere zweiteilige Düsen verwendet werden, aus [18].





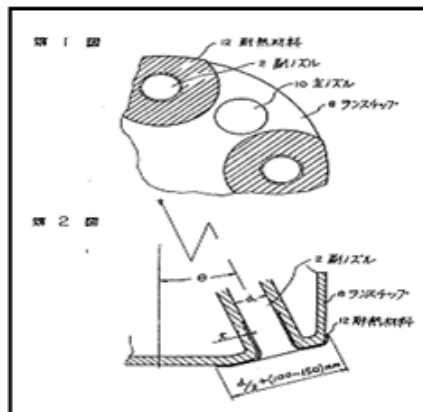
Die Verwendung eines zweiten Gasesstromes zum Schutz der Düsenkanten wird hier erstmals erwähnt. Nachteile dieser Idee sind vor allem die komplizierte Ausführung der Sauerstoff- und Wasserzuleitungen, sowie Schwierigkeiten bei deren Abdichtung und Auswechslung.

Das Schutzrecht DE3508618 [19] beschreibt eine Blaselanze, bei welcher das metallische Innenrohr von einem keramischen Schutzmantel umgeben ist. Der Bereich zwischen Innen- und Außenrohr kann gekühlt werden. Der Vorderteil des Düsenkopfes ist angeschraubt und besteht aus feuerfestem Material (siehe Abb. 21 aus [19]). Die Lanze besitzt eine zentrale Düse für das Aufblasen von Gasen. Zur besseren Durchmischung des Bades und zum Aufschäumen der Schlacke hat sich aber die Sechs-Loch Lanze durchgesetzt und diese Erfindung wird nicht verwendet.



**Abb. 21:** Blaselanze mit einem metallischem Innenrohr, das von einem keramischen Schutzmantel umgeben ist, aus [19].

Beim Schutzrecht JP63206420 [20] ist der Vorderteil der Düse mit einem feuerfesten Material (Keramik) ausgekleidet, siehe Abb. 22 aus [20], um die Kante der Düse zu schützen.

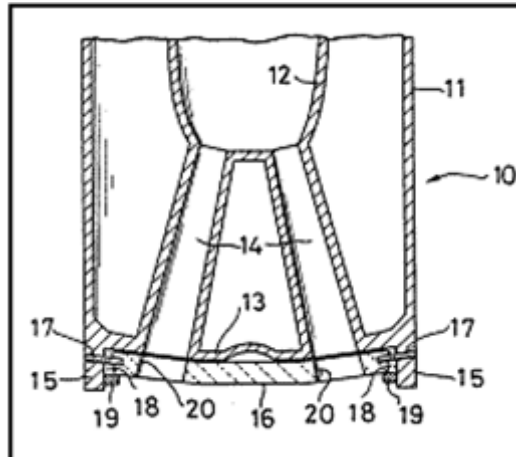


**Abb. 22:** Der Vorderteil der Düse ist mit einem feuerfesten Material (Keramik) zum Schutz der Kante der Düse ausgekleidet, aus [20].





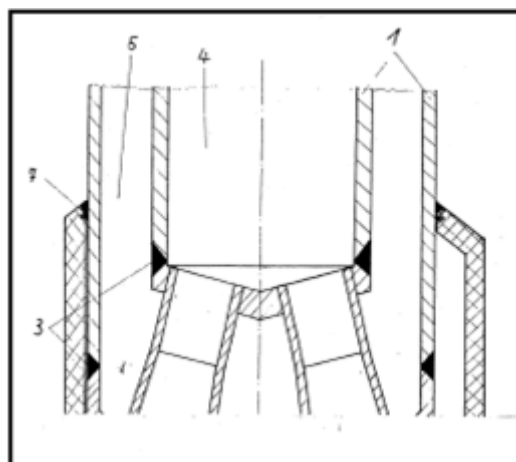
Bei Schutzrecht JP61213311 [21] ist die Grundplatte zum Schutz der Düse aus Keramik gefertigt, Abb. 23, aus [21].



**Abb. 23:** Schutz der Düsen bzw. der Düsenkanten mit einer Keramikplatte, aus [21].

Wie in [20] wird auch hier versucht, die Kanten der Düsen mit Hilfe der keramischen Werkstoffe zu verstärken. Die Verbindung der Keramikplatte mit dem Lanzenkopf, sowie ihre Anpassung an die Wärmedehnung des Kupferkopfs ist eine technische Herausforderung. Auch die Auswahl einer passenden Keramik ist schwierig und in der Praxis bis heute nicht gelungen.

Das Schutzrecht DE3122178 [22] beschreibt eine wassergekühlte Blaslanze mit einem auswechselbaren Düsenkopf aus feuerfestem Material (Keramik), siehe Abb. 24 aus [22].



**Abb. 24:** Wassergekühlte Blaslanze aus Kupfer wird mit einem auswechselbaren Außenmantel aus feuerfestem Material (Keramik) bedeckt, aus [22].



Die Auswahl einer geeigneten Keramik ist wegen den herrschenden Beanspruchungen technisch sehr anspruchsvoll. Unterschiedliche Ausdehnungskoeffizienten der Materialien erschweren das Herstellen einer dauerhaften Verbindung. Das Feuerfestmaterial ist hier als eine „Kappe“ zum Lanzenkopfschutz angedacht worden. Durch deren Wanddicke verändert sich unter anderen die Form der Lavaldüse beträchtlich. Dies ist ein wesentlicher Nachteil.

In der Publikation Nr.: 06/130308 [23] wird ein Lanzenkopf beschrieben, der durch Öffnungen, die an der Seiten angelegt sind, vor Schlackenverbärungen geschützt werden soll, Abb. 25, aus [23].

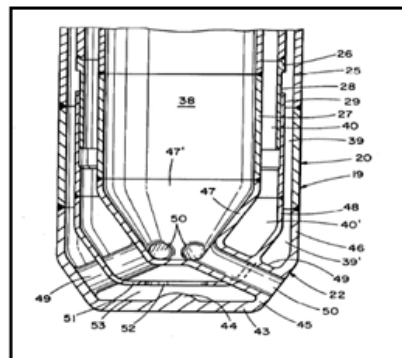


Abb. 25: Ein Lanzenkopf mit Öffnungen an den Seiten, aus [23].

Die Grundidee, den Lanzenkopf durch das Umströmen von Inertgasen zu schützen, ist vielversprechend. Das Einbauen von zusätzlichen Leitungen durch einen wassergekühlten Lanzenkopf ist aber schwierig. Auch das Auswechseln der Köpfe nach dem Einsatz ist de facto nicht möglich. In der Publikation Nr. 3730505 [24] wird eine Lanze in einem eigenen zusätzlichen Rohr vorgeschlagen, über das ein Schutzgasfilm (oder auch andere Medien) über die Lanze geleitet werden soll, siehe Abb. 26, aus [24].

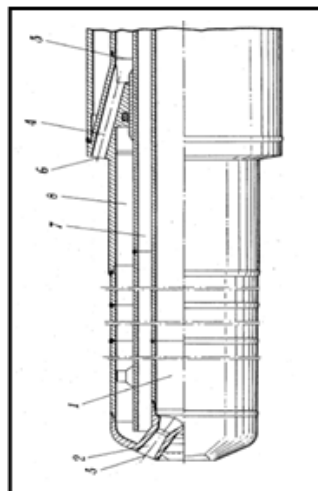
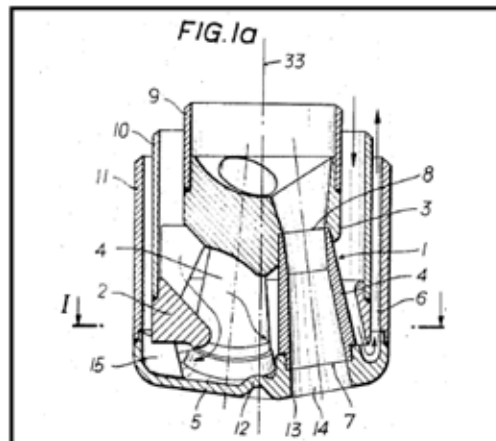


Abb. 26: Wassergekühlte Sauerstofflanze in zweiwandiger Ausführung zum Einbringen von zusätzlichen Medien in die Metallschmelze, aus [24].



Der Wunsch, mit der Sauerstofflanze einige zusätzliche Funktionen auszuüben wie. z.B.: das Einbringen von Staub, Kalk oder zusätzlichen Sauerstoff in die Metallschmelze, ist hier ersichtlich. Die komplizierte Konstruktion, verbunden mit der Wasserkühlung, lässt dabei aber nicht viel Raum für das Einbauen zusätzlicher Aggregate. Als Nachteil ist auch anzuführen, dass das Gewicht der Lanze durch den Aufbau wesentlich größer als bei herkömmlichen Lanzen ist.

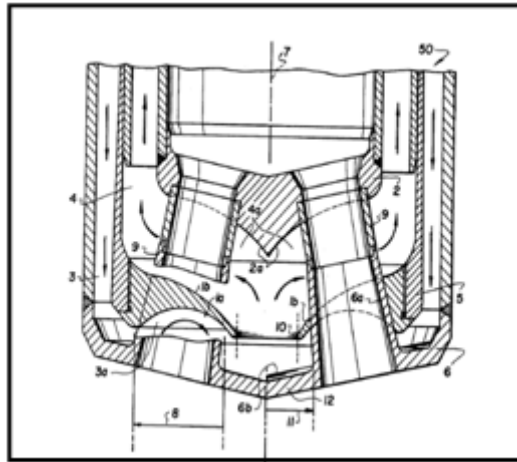
In der Offenlegungsschrift Nr.:05/202702 [25] wird ein Düsenkopf für eine wassergekühlte Lanze, die mindestens eine Anschlussöffnung für ein gasförmiges Raffinierungsmittel enthält, beschrieben, Abb. 27, aus [25]. Dies wird durch Aufteilen des Stirnbereichs in mehrere Einzelbereiche erzielt.



**Abb. 27:** Düsenkopf für eine wassergekühlte Lanze mit aufgeteilten Stirnbereich in mehrere Einzelbereiche z.B. der vorderen Platte, aus [25].


Dies ist der in Abb. 23. dargestellten Idee sehr ähnlich. Die komplizierten Verbindungen verschiedener Materialien, der Kühlwasserkanäle und der Düsen sind auch hier Schwachstellen für den praktischen Betrieb.

In der Offenlegungsschrift Nr. 05/905007 [26] wird diese Idee noch weiter ausgebaut. Mehrere verschiedene Medien sollen hier gleichzeitig in den Konverter eingebracht werden. Auch diese sehr komplizierte Idee (siehe Abb. 28, aus [26]) hat sich in der Praxis nicht durchgesetzt.



**Abb. 28:** Düsenkopf für eine wassergekühlte Lanze. Mehrere verschiedene Medien sollen hier gleichzeitig in den Konverter eingebracht werden [26].

Aus diesem kurzen Überblick über die Patentlandschaft ist der Wunsch der Metallurgen abzulesen, nicht nur die Lebensdauer der Lanze zu verbessern, sondern darüber hinaus auch der Lanze neue Aufgaben zuzuordnen. Eine weitere Möglichkeit zur Funktionsverbesserung, die ebenfalls in den Patenten erwähnt wird, ist die Wahl von alternativen Werkstoffen (Keramiken). Dadurch könnte die Lanze zu einem Multifunktionswerkzeug werden, das neue Prozessmöglichkeiten eröffnet.

<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik Montanauniversität A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH) Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	--

### 3. Beanspruchungen des Lanzenkopfes und der Düsen


Die Lanze und ganz besonders ihr Kopf sind durch die metallurgischen Prozesse besonders hohen Beanspruchungen ausgesetzt. Diese werden durch die hohen Temperaturen, die heftigen Strömungen des Sauerstoffs und der Prozessgase und durch den direkten Kontakt mit der Schlacke hervorgerufen.

Aus Kapitel 2 geht hervor, dass der Lanzenkopf mit seinen exakt ausgelegten Lavaldüsen besonders wichtig für den reibungslosen Ablauf des Frischungsprozesses ist. Die Lanzenköpfe, die aufgrund der im Stahlwerk vorliegenden Betriebsbedingungen konzipiert wurden, arbeiten naturgemäß nur so lange optimal, wie die mit hoher Präzision gefertigten Düsen ihre ursprüngliche, aus den Gesetzen der Strömungslehre abgeleitete Form behalten. Dies gilt insbesondere für die Kanten der Düsenaustrittsöffnungen. Kommt es während des Betriebes zum Verschleiß der Kanten, so ist ein optimales Arbeiten der Düsen nicht mehr gewährleistet. Unter Kantenverschleiß ist die mehr oder weniger ausgeprägte Abrundung oder Ausfransung der ursprünglich scharfkantigen Düsenaustrittsöffnungen zu verstehen. Die Folgen eines solchen Kantenverschleißes sind in erster Linie:

- zu hohe Verschlackung des Eisens und damit unzureichendes Stahlausbringen und als dessen Folge,
- zu hoher Verschleiß an sehr teurem Feuerfestmaterial, also Verminderung der Konverterhaltbarkeit.

Außerdem werden bei einem nicht ideal expandierten Sauerstoffstrahl aus der Lavaldüse seine Eindringtiefe in die Metallschmelze und damit die Reaktionsfläche reduziert. Dies bewirkt die zeitliche Verschiebung der thermodynamischen bzw. metallurgischen Reaktionen, was wiederum die Stahlqualität nachteilig beeinflusst.

Die Lanzen und somit auch ihr Kopf sind während des Frischungsvorganges von einer dichten Schlackenemulsion umgeben. Berührt diese die wassergekühlte Oberfläche der Lanze, so kühlt sie sich ab, und kann haften bleiben. Dies wird als „Verbären“ der Lanze bezeichnet und stellt ein großes Problem für den Prozess dar. Die Dicke der anhaftenden Schicht kann innerhalb einer Charge um bis zu 3 cm zunehmen. Betroffen davon sind meist die untersten vier Meter der Lanze. Die Verbärung schreitet während der folgenden Chargen schnell fort, bis eine kritische Masse des anhaftenden Materials erreicht wird und die „Bären“ wegen des zu hohen Gewichtes entfernt werden müssen, Abb. 29.

<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik Montanauniversität A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH) Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	--



**Abb. 29:** Verbärung der Lanze durch den Schlackenschaum und durch Metallspritzer.

Eine wichtige Problemstelle ist die Mitte der Stirnplatte des Lanzenkopfes. Diese ist erheblichen thermischen Belastungen, die von der Stahlschmelze verursacht werden, ausgesetzt. Hier ist die Strömungsgeschwindigkeit des Kühlmittels sehr gering. Daher kann es im Zentrum der Stirnplatte zur Bildung von Verbärungen oder auch zu Leckagen kommen.

Verbärungen und Leckagen können erhebliche Schäden bewirken und zum Ausfall der Lanzen führen. Davon abgesehen und in der Regel ist die Lebensdauer des Lanzenkopfes aber vor allem durch den Kantenverschleiß der Düsen bestimmt.

Die Lebensdauer des Lanzenkopfes ist je nach Ausführung und Beanspruchungsstärke sehr unterschiedlich. Sie beträgt zwischen 10 und 300 Einsätze. Bei 30 bis 35 Chargen pro Tag muss der Kopf somit im Durchschnitt jeden 3ten Tag gewechselt werden.

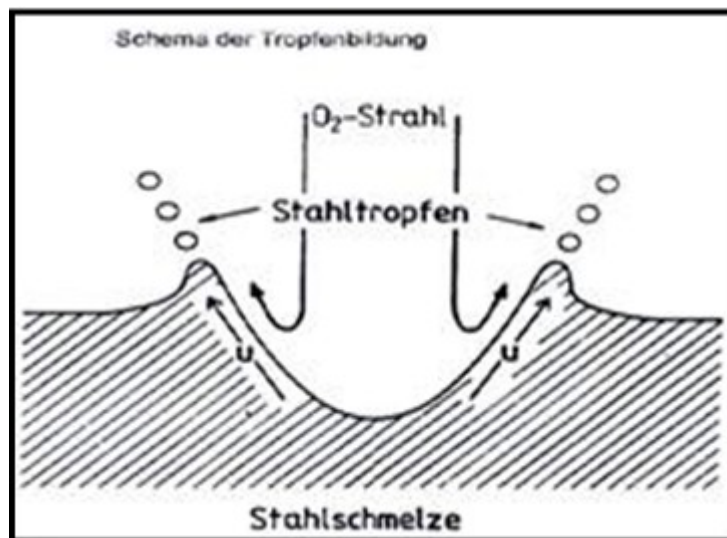
In der Folge wird der Stand des Wissens über die Strömungsverhältnisse und die Temperaturverteilung in der Nähe des Lanzenkopfes dargestellt.



### 3.1 Strömungsverhältnisse im Bereich des Lanzenkopfes

Wie in der Kapitel 2.2.5 beschrieben ist der Einsatz der Lavaldüsen für den LD- Prozess sehr wichtig. Das Aufblasen des Sauerstoffes durch die Düsen auf die Metallschmelze darf aber nicht isoliert, sondern im Zusammenhang mit anderen Strömungen im Konverter, wie die der Gase, Schlacke, Dämpfe... betrachtet werden.

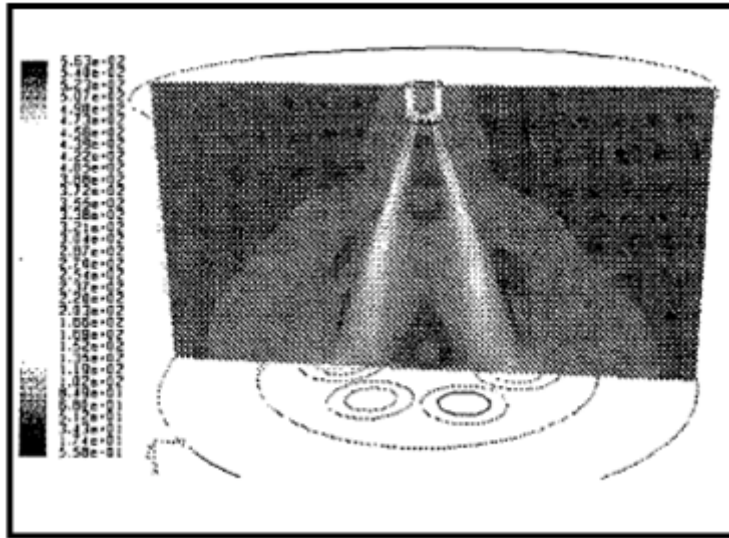
So wird in der Veröffentlichung „A New Lance Design for BOF- Steelmaking“ [27] eine Simulation ausgeführt, in der die räumliche Anordnung der flüssigen Schlacke als besonders wichtig für den LD- Prozess erkannt wird (beispielsweise hängt die Dephosphorisation sehr stark von der räumlichen Anordnung der Schlacke ab, [27]). Wie bereits beschrieben werden Temperatur, Kinetik und Stoffübergang durch das Mischen des flüssigen Metalls mit der Schlacke bestimmt. Durch den Zusammenstoß des Sauerstoffstrahles mit dem flüssigen Metall werden kleine Metalltröpfchen hochgeschleudert, (Abb. 30, aus [7]). Die Produktion und die Optimierung der Schlackeschaumbildung können unter anderen durch die Intensität der Sauerstoffstrahlen kontrolliert werden.



**Abb. 30:** Erzeugung von Tröpfchen auf der Oberseite des Stahlbades durch den Sauerstoffstrahl. Die Tröpfchenbildung hängt von der Neigung der Düse und der Intensität des Sauerstoffstrahls ab, aus [7].

Weiteres wird in [28] auch die Strömung des Sauerstoffstrahls analysiert. In vielen grundlegenden Studien [7, 27, 28, 29] findet man Angaben über Tiefe und die Breite des Reaktionsraums, der durch den Zusammenstoß des Gasstrahles mit der Flüssigkeit gebildet wird. Wie in der Abb. 31, aus [27] dargestellt dringen die Gasstrahlen tief in das Schmelzbad ein.






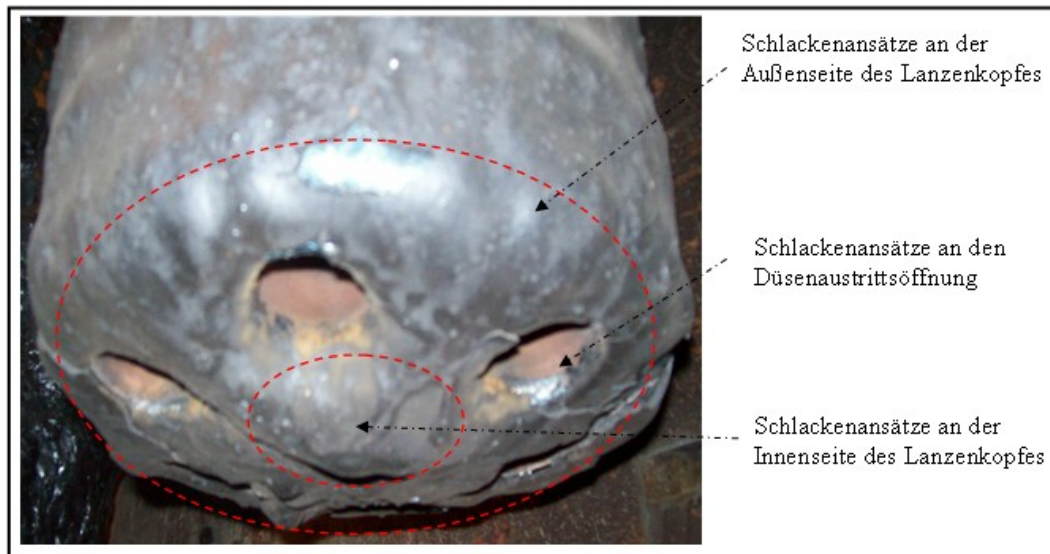
**Abb. 31:** Eine Simulation aus [27] zeigt, dass die Sauerstoffstrahlen tief in die Schmelze eindringen. Dabei werden in der Schmelze nahezu konzentrische Kreise gebildet. Diese sind scharf gebündelt und vereinen sich nicht.

Die aufgeschäumte Schlacke steigt etwa 2 bis 3 Minuten nach Beginn des Blasens auf und bedeckt dann den Lanzenkopf vollständig. In Abb. 32 wird ein Lanzenkopf gezeigt, der mit einer Schicht aus Schlacke ummantelt ist. Auch hier wurde die umgebende Schlacke durch den Sauerstoffstrahl aus den Düsen über den Lanzenkopf miteingezogen. Man findet sogar Schlackenansätze im Innenbereichen der Düsen.

Das Miteinziehen von Schlackenschaum führt zu einer Verringerung der Strömungsgeschwindigkeit des Sauerstoffstrahles. Dieser Effekt nimmt mit der Dichte des Schaumes zu (der Schlackenschaum ist mindestens zwei Größenordnungen dichter als der Sauerstoff). Der Sauerstoffstrahl verliert daher auch bei einem geringen Anteil an mitgezogenen Schlackenschaum einen bedeutenden Teil seiner Geschwindigkeit, die beim Kontakt mit der Schmelze zur Erzeugung der Schlackenemulsion benötigt wird. Dies wurde bereits früher vermutet [7, 27], das Ausmaß konnte aber bisher nicht quantitativ ermittelt werden.



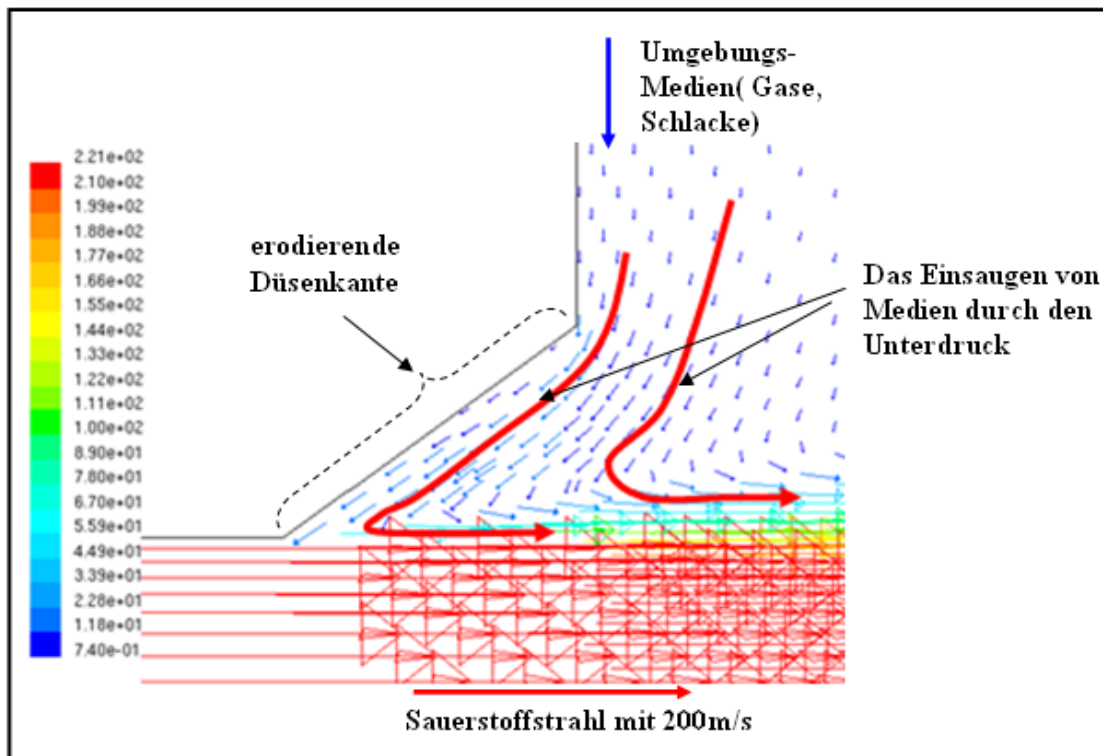
<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik Montanauniversität A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH) Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	--



**Abb. 32:** Der Lanzenkopf einer Sauerstofflanze nach dem Einsatz im LD- Konverter. Die während des Prozesses angesetzte Schlacke am Lanzenkopf und im Innenbereichen der Düsen ist deutlich zu sehen.

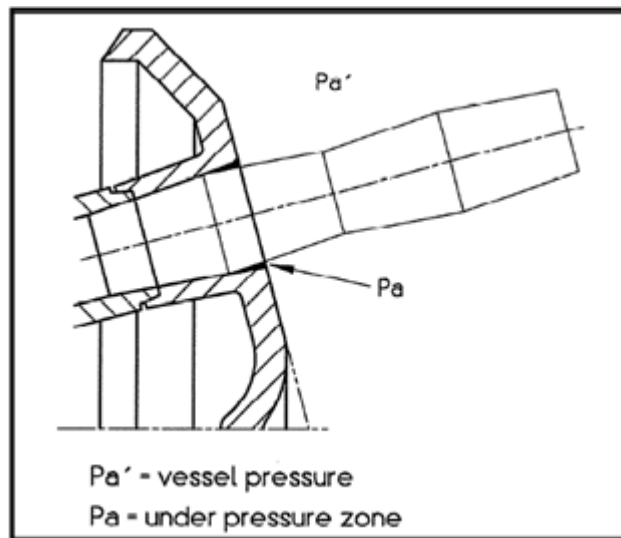
Bereits sehr kleine Mengen an Schlacken- und Metallspritzern führen zur Bildung von Bären (Schlackenansätzen) an der Stirnseite des Lanzenkopfes und im Innenbereichen der Düsen (Abb. 32). Diese Verbärung bildet quasi eine Schutzschicht (thermisch und mechanisch) für den Lanzenkopf. Kommt es jedoch (z.B. wegen mangelhafter Kühlung des Lanzenkopfsterms) zu keiner Verbärung, so bleibt die Stirnseite des Lanzenkopfes ungeschützt und dadurch der thermischen Strahlung des Stahlbades voll ausgesetzt.

Wie im Abb. 16. dargestellt neigen die Strömungen mit steigendem Druck zur verstärkten Ablösung in der Grenzschicht und in der Folge zur Verwirbelung. Diese Neigung ist besonders groß, wenn der Sauerstoffdruck in der Lavaldüse gerade etwas unter- oder auch über dem Gesamtdruck aus der Umgebung liegt (siehe Abb. 17). Dieser Effekt wird durch den Verschleiß der Düsenkante noch verstärkt. Dann werden Umgebungsmedien noch intensiver in die Düsenöffnung angesaugt. Dadurch kann es zur Bildung von Bären im Innenbereichen der Düsen kommen. Ähnliche Effekte bzw. Verschleißbilder sind auch beim Corex oder Finex Sauerstoffblasformen (Unterschallströmung) zu beobachten. Um die strömungstechnischen Vorgängen an einer beim Corex-Verfahren erodierenden Düsenkante zu verdeutlichen, wurde vom SIEMENSVAI eine Studie im Auftrag gegeben. Ein Ergebnis dieser Studie ist in Abb. 33, aus [30] dargestellt:



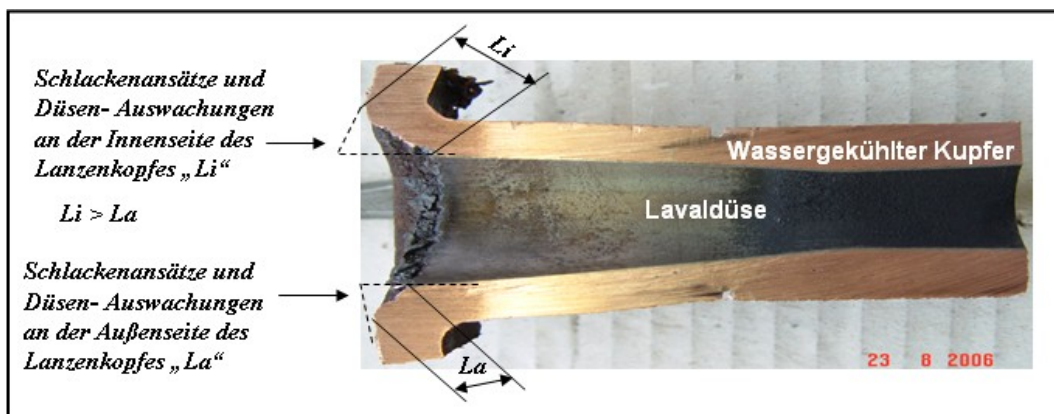
**Abb. 33:** Das Ansaugen der Umgebungsmedien (Metall, Schlacke, Gase...) in die Düsenöffnung, wird durch eine schon verschleißende Düsenkante bzw. durch den entstandenen Unterdruck noch verstärkt, aus [30].

Es gibt nur wenige theoretische Arbeiten, die diese Strömungsverhältnisse in der Umgebung des Lanzenkopfes beschreiben. Die meisten beschränken sich auf die Verhältnisse an der Düsenkante. So wird in der der Veröffentlichung „The influence of design and process operation on BOF lance tip life“ [31]. angeführt, dass während des Blasvorgangs die Druckverhältnisse an der Düsenkante instabil sind. Weiteres wird beschrieben, dass diese Instabilität zur Ablösung des Sauerstoffstrahles knapp vor der Kante in der Düse führt. Dadurch entfällt die Kühlung der Düsenkante durch den ausströmenden (kühlenden) Sauerstoffstrahl. Zusätzlich wird dadurch das Ansaugen der Umgebungsmedien (Gase, Schlacke und Metallspritzer) in die Düsenöffnung verstärkt (siehe. Abb.34, aus [31]).




**Abb. 34:** Entstehung des Unterdrucks ( $P_a$ ) an der Düsenkante während des Blasvorgangs bei instabilen Druckverhältnissen im Konverter ( $P_{a'}$ ), aus [31].

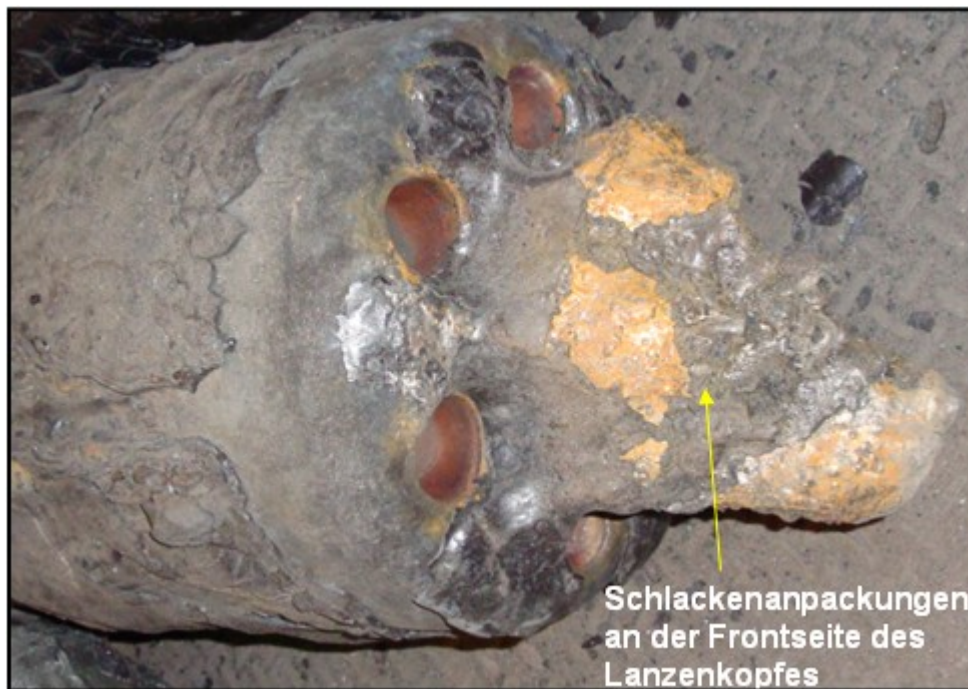
Zur Verdeutlichung der Strömungsverhältnisse im Konverter wurden in Rahmen dieser Arbeit die Verschleißbilder der Lanzenköpfe analysiert. Aus Abb.35. ist zu erkennen, dass der Verschleiß der Lavaldüse an der Innenseite des Kopfes (im Lanzenkopfsterne) ( $L_i$ ) größer als an der Außenseite ( $L_a$ ) ist. Dies legt nahe, dass die Gasrückströmungen auch im Bereich des Lanzenkopfsterne (zwischen den Sauerstoffdüsen) relativ stark sind. Fehlt im Lanzenkopfsterne aber der Schutz durch die Verschlackung (aufgrund der mangelnder Kühlung), so führen die in den Gasrückströmungen erhaltenen abrasiven Partikel zu Auswaschungen der Düsenkanten.



**Abb. 35:** Verschleiß an den Kanten einer Lavaldüse für LD- Prozess. Da  $L_a < L_i$  ist, ist der Verschleiß an der Außenseite des Kopfes kleiner als an der Innenseite.

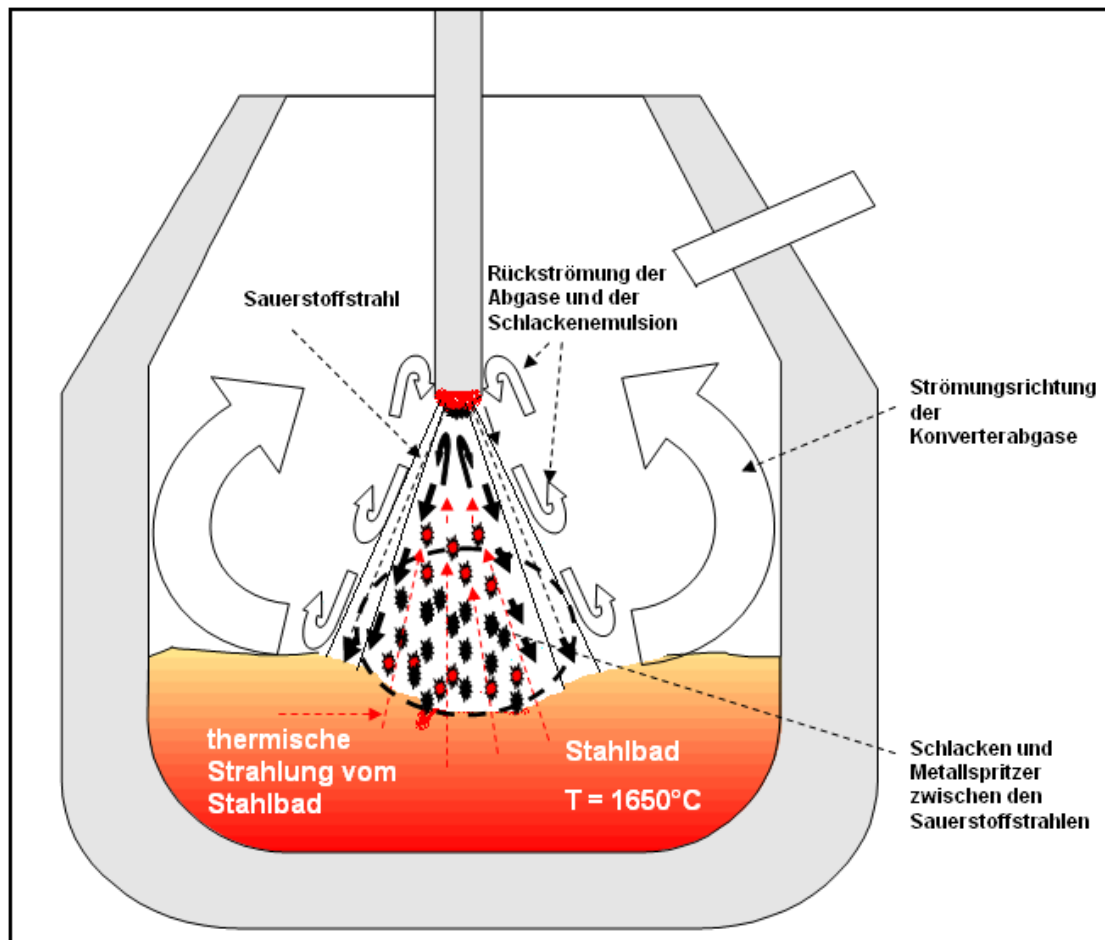
<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik Montanauniversität A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH) Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	--

Die an der Lanze beobachtete Verbärung (Abb.36.) zeigt deutlich, dass Schlacken auch zwischen den Sauerstoffstrahlen bzw. im Stirnbereich auftreten. Bleibt die Schlacke haften, so beginnt die Verbärung. Dieser Vorgang setzt sich während des Prozesses fort und die anhaftende Schlackenummantelung nimmt an Größe zu. Dadurch ist die gesamte Lanzenoberfläche bedeckt und von anderen Umgebungs- Einflüssen (z.B. Strahlung vom Stahlbad oder Brennfleck) geschützt.



**Abb. 36:** Die Verbärung nimmt auch zwischen den Sauerstoffdüsen zu. Im Stirnbereich ist eine starke Verbärung zu erkennen. Die Schmelztemperatur der Schlacke, die diesen Bären bildet, beträgt etwa 1300 °C. Daher kann die Temperatur in diesem Bereich nicht mehr als 1300 °C betragen haben.


Die für diese Arbeit wichtigsten Strömungsverhältnisse sind in der Abb.37. schematisch dargestellt. Es ist naheliegend, dass die Strömung der Schlackenemulsion im Bereich des zwischen dem Lanzenkopf und der Metallschmelze weitgehend ähnlich wie die Strömung des Sauerstoffes erfolgt. Im Raum zwischen den Sauerstoffstrahlen in der Mitte des Konverters kommt es zu einer höheren Schlackenkonzentration als von vielen Fachleuten im Betrieb vermutet. Daher kann es zur Verbärung am Stern des Lanzenkopfes kommen. Die Expansion der Gase aus den Lavaldüsen verursacht die Umgebungsmedien in den Strahl zu ziehen. Dies kann bis in die Düsen hinein erfolgen (Abb. 32).



**Abb. 37:** Gas- und Schlackenströmungen in einem LD- Konverter, schematisch. Der Bereich zwischen den Sauerstoffstrahlen in der Nähe der Badoberfläche wird besonders gut „aufgeschäumt“. Dieser Bereich (strichlierte Ellipse) wird Brennfleck genannt.

Aus dieser Beobachtung wird ersichtlich, dass die wechselhaften (durch den Prozess bedingten) Strömungsverhältnisse nicht nur des Sauerstoffstrahles sondern vor allem auch der Schlacken und Gase an und in den Sauerstoffdüsen die grundlegende und anfängliche Ursache für den Verschleiß der Düsenkanten sind.



<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik Montanauniversität A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH) Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	--

### 3.2 Thermische Bedingungen im Bereich des Lanzenkopfes

Die Lanzen und der Lanzenkopf werden mit Wasser gekühlt. Dabei wird besonderes auf die Gestaltung der Wasserführung geachtet. Strömungsgeschwindigkeit und das Strömungsverhalten des Kühlwassers sind entscheidende konstruktive Kriterien. Z.B. sind speziell Wasserleitrippen für die Innenseiten des Lanzenkopfes entwickelt worden. Etwa 175 - 250 m<sup>3</sup> Wasser mit einer Eingangstemperatur von 20° C werden pro Stunde mit einer Geschwindigkeit von etwa 20 m/s in die Lanze gepumpt. Dadurch wird die Wärme abgeführt, welche durch Strahlung und Konvektion an die Lanze übertragen wird.

Es gibt nur wenige Arbeiten zur Temperaturverteilung im Lanzenkopf [7, 31, 32]. Dabei wird oft von einer Energiebilanz ausgegangen, wobei über die Wassereingangstemperatur (etwa 20° C) und die Wasseraustrittstemperatur (etwa 60° C) die integrale Wärmeabfuhr durch die Lanze bestimmt wird. Diese Betrachtungen liefern jedoch keine verlässlichen Angaben über die lokale Temperaturverteilung im Lanzenkopf. Dazu müssen viele weitere Annahmen getroffen werden, z.B. über die Strahlung durch das Stahlbad, den Wärmeübertrag durch den direkten Kontakt des Kopfes mit der Schlackenemulsion, über die Konvektion und über die Kühlung der Düsenbereiche durch die Expansion des Sauerstoffs. Selbstverständlich müssen auch die thermischen Eigenschaften der Werkstoffe der Lanze und Kopfes (Stahl und Kupfer) als Funktion der Temperatur berücksichtigt werden. Wegen der Verbärung ändert sich der Wärmefluss durch den Lanzenkopf ständig. Exotherme, an der Lanzenoberfläche auftretende chemische Reaktionen führen zusätzlich zur Erwärmung der Lanze. Auch Reflexionen des Sauerstoffstrahles durch das Stahlbad können einen hohen Wärmefluss auf die Lanzenoberfläche verursachen, vor allem im Bereich der Lanzenspitze, insbesondere wenn Stahlpartikel mitgerissen werden. Verlässliche Angaben über die Mengen an Stahlspritzern und die Mengen an Sauerstoff-Reflexionen sind nicht verfügbar [7]. Wie im Kapitel 2.2.4 beschrieben verändert sich die Lanzenposition während des Prozesses. Dies ändert die Strömungs- und Strahlungsverhältnisse und macht die Berechnung der Wärmeflüsse noch schwieriger. Wegen der Vielzahl dieser Einflussgrößen, von denen sich einige auch noch mit der Zeit verändern, ist es nicht verwunderlich, dass keine gesicherten Angaben über die Temperaturverteilung im Lanzenkopf vorliegen und dass dieser Aspekt kontroversiell diskutiert wird.

Ein interessantes Ergebnis ist in einer älteren Arbeit dargestellt [7]. Danach sind die Temperaturen im Bereich der mit dem Lanzenkopf in Kontakt stehenden Schlacken (größer als) etwa 1600°C. Durch die oben beschriebenen Strömungen können Stahltröpfchen, die mitgerissen werden, in die Nähe der Düsenkante gelangen. Die abrasiven und heißen Partikel können mit dem austretenden Sauerstoff reagieren. Diese exothermen chemischen Reaktionen (wie z.B.  $\text{Fe} + \text{O}_2/2 = \text{FeO}$ ,  $T > 2500^\circ$ , siehe Abb.39. [7]) führen zur Abgabe von Wärme und in der Folge zu sehr hohen Temperaturen direkt an der Düsenkante. Die Reaktionen können auch explosionsartig verlaufen. Dadurch können lokal hohe Gasdrücke an der Düsenkante



entstehen. Beides führt letztendlich zum Verschleiß bzw. zu „Auswaschungen“ des Materials (Kupfer) an der Düsenkante.

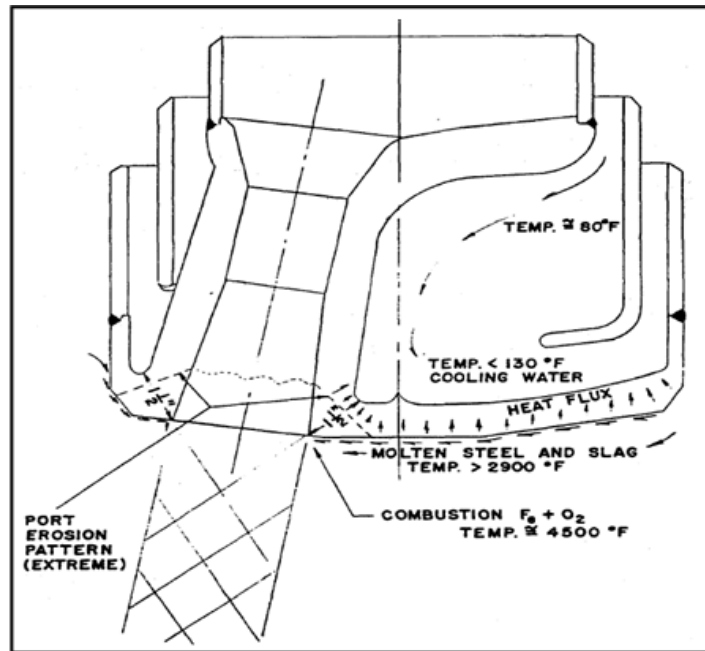


Abb. 38: Temperaturen im Sauerstofflanzenkopf und in seiner Umgebung, aus [7].

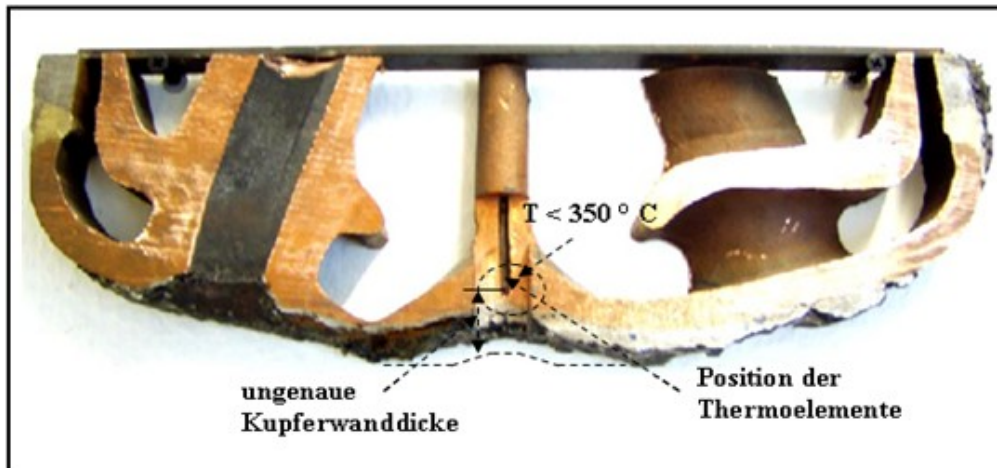
In einem amerikanischen Patent [33] wird ein Lanzenkopf aus Kupfer mit einer integrierten Temperaturmessung beschrieben. In die Mitte des wassergekühlten Kopfes ist eine Sacklochbohrung angebracht, in die ein Thermoelement zur Temperaturmessung eingeführt ist. Da das Thermoelement durch eine etwa 12 mm dicke Kupferschicht geschützt wird, hat die thermische Strahlung keinen unmittelbaren Einfluss auf die Messung (siehe Abb.39) [33].

Das Ergebnis der Messungen ist in Abb. 40. zu sehen. Aufgetragen sind die durch das Thermoelement gemessenen Temperaturen als Funktion der Zeit. Die Werte für die Chargen Nr. 93 und Nr. 169 sind „herausgezoomt“. Insgesamt ist die Messung etwa über 250 Chargen erfolgt. Die Temperaturen haben den Wert von 350°C nie überschritten, obwohl zu Ende der Messungen die Kupferschicht bereits extrem dünn war (etwa 3 mm). Dies ist auf die effektive Kühlung des Lanzenkopfes (und auch auf die Position des Thermoelementes) zurückzuführen. Die Zunahme der Temperatur im Thermoelement mit zunehmender Chargennummer ist auf dem Verschleiß des Kopfes im Sternbereich zurückzuführen, d.h. der Abstand zwischen dem Thermoelement und der erwärmten Oberfläche hat sich während der Untersuchungen von 12 mm auf etwa 3 mm verringert. Extrapoliert man die mittlere Temperatur auf 0 mm (die Oberfläche), so erhält man die Temperatur an der Stirnseite des Lanzenkopfes. Sie beträgt etwa 300 – 600 °C. Das Auftreffen und Oxidieren von Stahlspritzern führt – wie bereits oben erwähnt - zusätzlich zu kurzfristigen lokalen Temperaturanstiegen. Viele solche Ereignisse

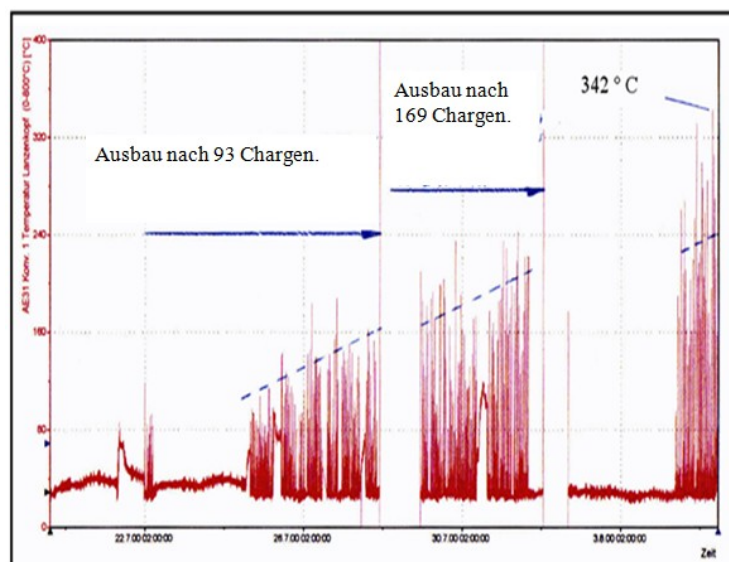





sind als Temperaturspitzen in ebenfalls zu erkennen. Wie gesagt steht zu vermuten, dass diese Spritzer zu einer kurzfristigen lokalen Temperaturanstieg an der Kupferoberfläche führen, bei denen sogar die Schmelztemperatur des Kupfers überschritten wird. Dies führt zum Verschleiß des Lanzenkopfes und zur Verringerung der Wandstärke des Kupfermantels.



**Abb. 39:** Lanzenkopf mit integriertem Thermoelement zur Temperaturmessung. Die Kupferwand über dem Thermoelement war zunächst etwa 12 mm dick. Nach der Messung betrug die verbliebene Wandstärke etwa 3 mm [33].




**Abb. 40:** Messung der Temperatur in der Kupferwand des Lanzenkopfes. Aufgetragen ist die Temperatur über der Zeit. Die Chargen Nr. 93 bzw. Nr. 169 sind „herausgezoomt“, aus [33]. Durch den Verschleiß der Kupferwand ist das Thermoelement mit steigender Chargenzahl näher an die erwärmte Stirnfläche gekommen, was zu einem Temperaturanstieg geführt hat.

<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik Montanauniversität A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH) Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	---

Wie im Kapitel 2.1.2 beschrieben dauert der dynamische Sauerstoffblasvorgang beim LD-Prozess im Durchschnitt bis zu etwa 20 Minuten. In der Abb. 2. [4] wurde der LD- Prozess in 4 Quartale unterteilt. Betrachtet man den Temperaturverlauf über der Zeit, so steigt die Temperatur des Metallbades im Konverter von etwa 1350°C (im ersten Quartal) auf bis zu 1650°C (im vierten Quartal) an. Da das Aufschmelzen des Schrotts am Anfang des Prozesses dem System Wärme entzieht, spricht man hier von einer zusätzlichen Schrottkühlung der Schmelze. Das wirkt sich auch auf die Temperaturentwicklung an der Oberfläche des Lanzenkopfes aus. Zu Beginn des ersten Quartals wird die Oberfläche der Lanze vorwiegend durch die Strahlung der Metallschmelze (Roheisen mit etwa 1200 °C bis 1300 °C) erwärmt. Die Temperaturen an der Oberfläche könnten diese Werte auch dann nicht übersteigen, wenn die Lanze nicht gekühlt wäre. Durch die Kühlung sind die Temperaturen im Kupfer aber wie oben gezeigt ganz wesentlich geringer. Nach circa 3 bis 5 Minuten Blasezeit steigt in der Regel die schaumige Schlacke auf, und ummantelt den Lanzenkopf schließlich vollständig. Die Schmelztemperaturen in dieser sehr silikatischen Frühschlacke betragen maximal etwa 1500°C, und in der Regel sogar wesentlich weniger (siehe Abb. 42; Wüsttit, 1370 °C, aus [34]). Da diese Schlacken durch den Kontakt mit dem Lanzenkopf erstarren und an ihm anhaften (Verbärung), müssen die Oberflächentemperaturen des Kopfes deutlich geringer sein. Auch dies steht in Übereinstimmung mit den oben beschriebenen Temperaturmessungen.

Im dritten und vierten Quartal des LD Prozesses steigen die Temperaturen der Metallschmelze auf bis zu 1650°C an. Daher kommt es auch zu einer Temperaturerhöhung im Lanzenkopf. Entsprechend steigt in den Chargen Nr. 93 und 169 (siehe Abb.41. aus [33]) die Temperatur während des Prozesses jeweils um etwa 60 °C bis 80 °C an. Es sei nochmals erwähnt, dass auch in dieser Phase die Temperatur des (gekühlten) Kupfers an der Oberfläche des Kopfes den Wert von 300 °C bis 600 °C nie überschritten hat.


<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik</b> <b>Montanauniversität</b> <b>A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH)</b> <b>Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	--

<b>Sauerstoffaufblaskonverter</b> Frühschlacke:	Kirschsteinit Monticellit Wüstitmischkristalle Olivin (Forsterit-Fayalit)	CfS CMS (Fe,Mn,Mg)O (Mg,Fe) <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>
Endschlacke:	β-Dicalciumsilikat Alit Dicalciumferrit Brownmillerit Magnesiowüstit Magnesioferrit Calciowüstit	C <sub>2</sub> S C <sub>3</sub> S C <sub>2</sub> F C <sub>4</sub> AF (Mg,Fe)O MgFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> (Ca,Fe)O

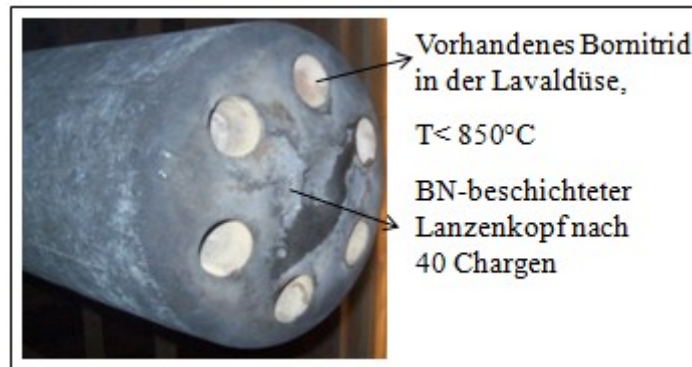
Name	Zusammensetzung	Schmelzpunkt [°C]
Alit	C <sub>3</sub> S	2070
Belit	C <sub>2</sub> S	2130
Wollastonit	CS	1544
Mayenit	C <sub>12</sub> A <sub>7</sub>	1455
Tricalciumaluminat	C <sub>3</sub> A	1535
Spinell	MgAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	2135
Hercynit	FeAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	1780
Gehlenit	CAS <sub>2</sub>	1590
Melilith	C <sub>8</sub> A <sub>3</sub> MS <sub>5</sub>	1400
Diopsid	CMS <sub>2</sub>	1391
Monticellit	CMS →	1500
Merwinit	C <sub>3</sub> MS <sub>2</sub>	1575
Kirschsteinit	CfS →	1208
Brownmillerit	C <sub>4</sub> AF	1395
Dicalciumferrit	C <sub>2</sub> F	1435
Wüstit	FeO →	1370
Flußspat	CaF <sub>2</sub>	1340
Cuspidin	C <sub>3</sub> S <sub>2</sub> CaF <sub>2</sub>	1400

**Abb. 41:** Zusammenstellung verschiedener Schlackentypen bei der Stahlherstellung anhand ihres Phasenbestandes und ihre Schmelzpunkte. Bestandteile der silikatischen Frühschlacke sind rot kenntlich gemacht, nach [34].

Es wird in diesem Zusammenhang öfter angeführt, dass die Temperatur an der Oberfläche der Lanze durch die Strahlungswärme, die vom Brennfleck ausgesendet wird, ganz wesentlich bestimmt wird. Wie in [35] beschrieben können die Temperaturen im Brennfleck bis zur 2800°C betragen. Würden die Strahlung des Brennflecks vollständig die Oberfläche der Lanze erreichen, so müsste dies im Strahlungsgleichgewicht zu einer deutlichen Erhöhung der Temperatur des Lanzenkopfes führen. Der Einfluss der Strahlungswärme des Brennflecks ist aber in den oben beschriebenen Temperaturmessungen (Abb.40) enthalten, da diese Aktivitäten während der Messung ja nicht „abgeschaltet“ werden konnten. Trotzdem wird die Oberfläche des Kopfes nur auf 300 °C Bis 600 °C erwärmt. Selbstverständlich spielt hier die

<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik Montanauniversität A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH) Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	--

Kühlung eine große Rolle. Es ist aber zu vermuten, dass die Strahlung in einem erheblichen Ausmaß von der Schlackenemulsion absorbiert wird, die sich zwischen dem Brennfleck und dem Lanzenkopf befindet. Dann wäre die Erwärmung des Lanzenkopfes vorwiegend auf den Kontakt mit den ihn umgebenden Schlacken zurückzuführen.



**Abb. 42:** Bornitrid als Temperaturindikator für Temperaturmessungen in den Lavaldüsen. In den Düsen ist die Schicht weiß und daher nicht oxidiert, außerhalb der Düsen grau und oxidiert. Die Temperaturen müssen somit innerhalb der Düsen  $< 850^{\circ}\text{C}$  und außer halb der Düsen zumindest kurzfristig  $> 850^{\circ}\text{C}$  gewesen sein.

Um die im Lanzenkopf bzw. in den Düsen auftretenden Temperaturen weiter einzugrenzen wurden vom Autor bei VOEST alpine Stahl AG eine Lanze, ihr Kopf und ihre Lavaldüsen mit hexagonalem Bornitrid beschichtet, (siehe Abb. 42). Es ist bekannt, dass in einer oxidierenden Umgebung das hexagonale Bornitrid bei Temperaturen über  $850^{\circ}\text{C}$  vollkommen oxidiert [36]. Wie in der Abb. 42 zu sehen war das Bornitrid (nach 40 Chargen Einsatz) an den Oberflächen der Lanze und des Lanzenkopfes komplett oxidiert (grau im Bild). In den Lavaldüsen war jedoch noch ausreichend Bornitrid vorhanden (weiß im Bild). Dies zeigt, dass die Temperaturen an der Oberfläche des Kopfes während der Einsatzdauer zumindest eine Zeit lang höher als  $850^{\circ}\text{C}$  waren, in den Düsen aber nicht. Dies könnte wiederum mit der lokalen Erwärmung aufgrund von verbrennenden Eisentröpfchen erklärt werden. Diese Reaktion kann zwar an den Stirnseiten des Kopfes, nicht aber im Inneren der Düsen auftreten.

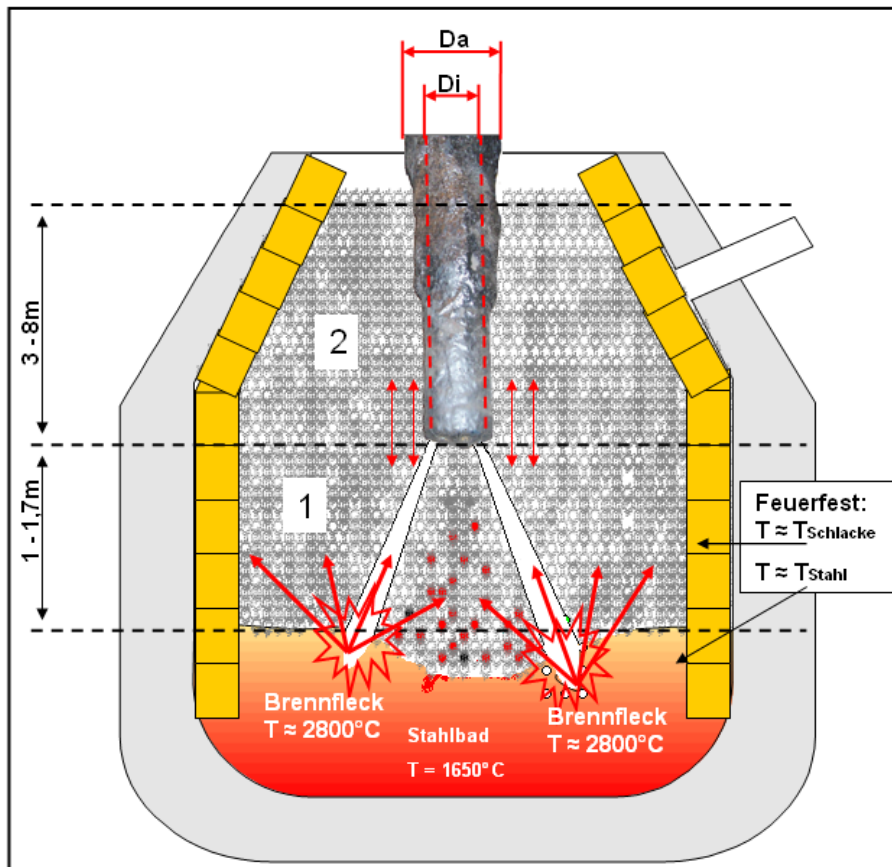



Abb. 43: Die strömungstechnischen und thermischen Vorgänge beim LD- Prozesses am Lanzenkopf.

Die strömungstechnischen und thermischen Vorgänge, die während des LD- Prozesses am Lanzenkopf stattfinden, sind in Abb. 43 zusammengefasst. Sie zeigt eine verbärte Sauerstofflanze in ihrer Position während des Blasvorgangs. Die Positionierung der Lanze ändert sich während des Prozesses. Abhängig von der Konvertergröße und dem Zeitpunkt des Prozesses kann die Lanze 1 bis 1,7 m über dem Badniveau positioniert werden. Der aus der Lavaldüsen expandierende Sauerstoff, der auf und in die Metallschmelze geblasen wird, ist dabei mit einem Winkel von  $12^\circ$  (LD- Winkel) von der Mittelachse der Lanze auf das Metallbad ausgerichtet. In der Abbildung sind außerdem noch die feuerfeste Ausmauerung, die schaumige Schlacke (Bereich 1 und Bereich 2), das Stahlbad und die Brennflecke während eines Blasevorgangs dargestellt.

Wie schon am Anfang dieses Kapitels beschrieben, bilden die Sauerstoff- Gasstrahlen beim Eindringen in die Schmelze lange Vertiefungen [27], welche die Reaktionsfläche bilden. Der Autor vermutet, dass die bei der Reaktion des Sauerstoffes mit den Elementen der Schmelze entstehende Wärme (Abb. 43, Temperaturen im Brennfleck bis  $2800^\circ\text{C}$ ) durch Strahlung in die Umgebung abgegeben und dabei Großteils durch das Stahlbad, und die schaumige Schlacke im Bereich 1 absorbiert wird. Nur ein geringer Teil dieser Strahlung erreicht – vor allem über die vom Sauerstoff gebildeten Vertiefungen - die Stirnseite des Lanzenkopfes.


<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik Montanauniversität A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH) Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	--

Der Lanzenkopf wird somit vorwiegend durch die ihn umgebende Schlackenemulsion erwärmt, welche wiederum von der Wärme des Brennflecks und des Schmelzbades erhitzt wird. Die vorne gemessenen Temperaturen im Kupfermantel des Kopfes und die extrapolierten Werte für die Temperaturen an der Stirnseite des Kopfes erhärten diese Vermutung.

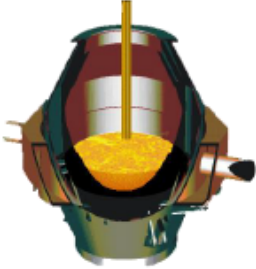

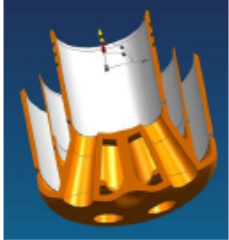
Es ist auch bekannt, dass die feuerfeste Ausmauerung eines LD- Konverters für Arbeitstemperaturen bis 1750° ausgelegt ist [37]. Bei höheren Temperaturen würde es zu starken chemischen Reaktionen und andren Beschädigungen des Feuerfestmaterials kommen. Da das Feuerfestmaterial den Belastungen aber für lange Zeit standhält, können seine Temperaturen im Betrieb diesen Wert zumindest nicht für längere Zeiten übersteigen. Auch dies spricht dafür, dass die Wärme des Brennflecks die Konverterwände nicht direkt aufheizt, weil sie durch die Schlacke und das Schmelzbad weitgehend absorbiert wird.

Zusammenfassend kann man sagen, dass sich die Temperaturen an der Oberfläche des Lanzenkopfes während des Frischprozesses variabel verhalten und im Wesentlichen durch den Kontakt des Kopfes mit der Schlackenemulsion verursacht werden. Die Temperatur dieser Schlackenemulsion kann während des Frischprozesses, von 1300°C am Anfang- und bis zu 1650°C am Ende des Prozesses betragen. Kurzzeitige lokale Temperaturerhöhungen sind aber durch Stahltröpfchen möglich, die durch den Kontakt mit dem Sauerstoff verbrennen, wobei Temperaturen bis 2800 °C entstehen.




<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik</b> <b>Montanauniversität</b> <b>A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH)</b> <b>Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	--

In der Table 1 sind alle wichtigen Prozessparameter für die Sauerstoffflanze und den Lanzenkopf zusammengestellt:

<b>Konverterbetrieb</b> Jahresproduktion $\sigma$ Chargenzahl $\sigma$ Roheiseneinsatz $\sigma$ Kalk $\sigma$ Gefäßdurchmesser Gefäßhöhe Reaktionsvolumen Spezifisches Reaktionsvolumen Abstichtemperatur (Stahlbad) Anzahl Bodenspüler Bodenspülung (Ar, N <sub>2</sub> ), Druck <b>Ausmauerung</b> Material Lebensdauer	<b>150 t Konverter</b> 5,1 Mt 93 pro Tag (max. 109 pro Tag) 780 - 850 kg/t 60 - 70 kg/t 6,5 m 8,8 m 120 m <sup>3</sup> >0,8 m <sup>3</sup> /t Stahl 1.655 °C 3 1,1 – 1,2 Bar Feuerfest (Basisch) 3. 000- 20. 000 Chargen	
<b>Lanze</b> Material Geometrie Geschwindigkeit Abstand zur Metallschmelze Gewicht (mit Kühlwasser) <b>Kühlwasser</b> Temperatur Menge	Hochlegierte Stähle (wassergekühlt) l = 27 m; $\varnothing$ = 406 mm, 20 km/h 0,5 bis 1,4 m 5 t T < 20°C (Eintritt); T < 50°C (Austritt) 175- 250 m <sup>3</sup> /h	
<b>Lanzenkopf</b> Material Geometrie Gewicht Temperatur Lebensdauer <b>Lavaldüsen</b> Düsenaustrittsöffnung Sauerstoffblaserate Sauerstoff (Verbrauch) Blasezeit <b>Sauerstoff</b> Menge Temperatur Austrittswinkel Blasedauer Teilchendichten (Austritt) Druck (Austritt) Geschwindigkeit (Austritt)	<b>6 Loch</b> Kupfer (gegossen, wassergekühlt) Rund mit 6 Lavaldüsen 25 – 43 kg von 1000- 1650°C (Aussen) von 10 bis 300 Einsätzen <b>6</b> 17 ° 550 - 700 Nm <sup>3</sup> /min (6 Düsen) 51 m <sup>3</sup> /t 10-20 min 550 - 700 Nm <sup>3</sup> /min 15 - 20 °C; (bis -150°C bei Expansion) 9 – 19 ° 10 – 20 min 1016 – 1018 cm <sup>3</sup> 0,8 - 1,5 Bar 300 m/s (Überschall)	

**Table 1.** Prozessparameter für die Sauerstoffflanze und den Lanzenkopf am Beispiel eines 150 t Konverter.




<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik Montanauniversität A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH) Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	--

#### 4. Zielsetzung und Lösungsweg

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die weiter oben beschriebenen Schwachstellen des Lanzenkopfes und der Lanze zu beheben und damit einen stabilen Prozessablauf im Stahlwerk zu gewährleisten. Dabei soll vorrangig die Entwicklung neuartiger Prozessdüsen für die Eisen- und Stahlerzeugung unter Verwendung neuer Werkstoffe (insbesondere der keramischen) betrieben werden. Die Optimierung der Form des Lanzenkopfes soll dabei im Mittelpunkt stehen. Diese neuen Prozessdüsen sollen wenn möglich durch Ihre Konstruktion zu einem aktiven Teil der Prozesssteuerung werden.

Daraus sollen sich folgende Vorteile für die Stahlwerksbetreiber ergeben:

- Die Kühlung der Sauerstofflanzenköpfe durch das Wasser kann entfallen oder deutlich verringert werden,
- das Entfernen der Lanzenverbärung bzw. die Reparatur der Lanze wird einfacher und kostengünstiger (bzw. sogar komplett entfallen),
- die neue Lanze kann durch Einbau von Sensoren zusätzliche Informationen zur Prozesssteuerung bzw. Prozessoptimierung liefern,
- die Temperaturmessung des Stahlbades (oder des Brennfleckes) sowie die Messungen der Lanzendistanz zum Metallbad werden durch Zusatzausrüstungen in der Sauerstofflanze möglich,
- das kontrollierte und kontinuierliche Einbringen von Stäuben, Granulaten bzw. Medien wird mit dieser neuen Lanze ermöglicht,
- das Wechseln der Lanzenköpfe wird vereinfacht werden.

<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik Montanauniversität A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH) Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	---

#### 4.1 Der Lösungsansatz mit der Ringspaldüse

Wie im Kapitel 3 beschrieben ist der Lanzenkopf gleichzeitig verschiedenen Beanspruchungen ausgesetzt. Diese sind vor allem die während des LD- Prozesses wechselhaften Strömungsverhältnisse und thermischen Verhältnisse an den Düsenkanten und um den Lanzenkopf. Weiteres ist der Lanzenkopf in ständigem Kontakt mit der LD- Schlacke, Metallspritzern, verschiedenen Produktionsgasen und Dämpfen.

Alle diese Beanspruchungen finden praktisch gleichzeitig während des LD- Prozesses statt und haben Anteil am Verschleiß des Lanzenkopfes bzw. der Düsenkanten. In dieser Arbeit ist es daher von größter Bedeutung, diese auftretenden Beanspruchungen nach ihrer Intensität, dem Zeitpunkt des Auftretens und der Reihenfolge zu ordnen.

Wie in [31] beschrieben ändern sich während des Blasevorgangs die Druckverhältnisse (Unter- oder Überdruck) an den Düsenkanten. Dies führt zur Ablösung des Sauerstoffstrahles vor der Düsenkante (in der Düsenöffnung). Was wiederum zum Ansaugen der Umgebungsmedien (Gase, Schlacke und Metallspritzer) in die Düsenöffnung führt. Zusätzlich entfällt dadurch die Kühlung der Düsenkante durch den ausströmenden und kühlenden Sauerstoffstrahl.

Somit sind die (durch den Prozess bedingten) wechselhaften Strömungsverhältnisse an und in den Sauerstoffdüsen die wesentliche und anfängliche Ursache für den Verschleiß der Düsenkanten. Zuerst werden die Umgebungsmedien in die Düse gesaugt und erst dann kommt es zu ihrem Kontakt mit der Düsenkante. Dies führt dann zu verschiedenen weiteren Aktivitäten an der Düsenkante wie z.B.: Reaktionen der Umgebungsmedien mit dem austretenden Sauerstoff bzw. Entwicklung sehr hoher Temperaturen und Drücke in diesem Bereich. Abrasion der Düsenkanten durch mitgerissenen Partikel und zuletzt des Schmelzen und Abtragung der aus Kupfer gefertigten Düsenkante ist die Folge.

Um dies zu verhindern oder zumindest abzumindern wird in dieser Arbeit die Idee verfolgt, die Düsen mit einem Ringspalt zu umgeben, der von einem Schutzgas durchströmt wird. Dieses Konzept wird Ringspaldüse genannt. Eine wichtige Idee besteht also darin, die Lavalldüsen und den Lanzenkopf durch Gase zu schützen, welche durch einen Ringspalt austreten.

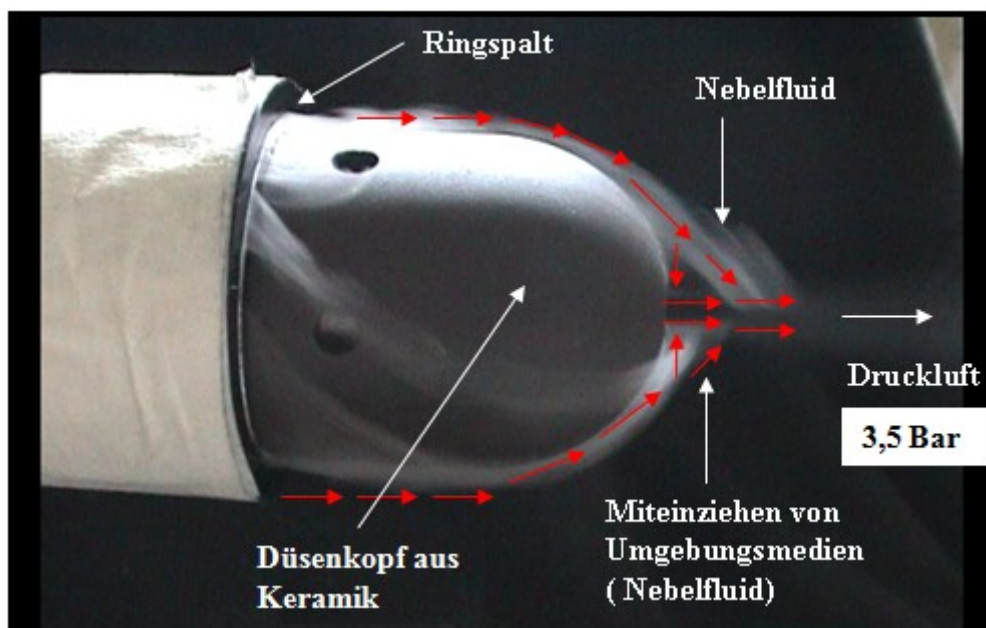
Die Expansion der Gase aus einer Lavalldüse und das Miteinziehen der Umgebungsmedien in den Strahl aus einer Ringspaldüse wurden zunächst in einem eigenen Versuch sichtbar gemacht Abb.44. Dazu wurde eine Lanze mit einer daran befestigten Lavalldüse in einem Lanzenkopf aus Keramik eingebaut, der von einem Ringspalt umgeben war. Zur Simulation des expandierenden Sauerstoffs wurde Luft mit einem Vordruck von 3,5 Bar durch die Lavalldüse gepresst. Der Luftdruck am Ausgang der Düse soll dabei 1 Bar bzw. gleich dem Umgebungsdruck sein um eine optimale Gasexpansion zu erzeugen. Zur Darstellung der Umgebungsmedien (Gase, Schlacke...), wurde Nebel mit Hilfe von Nebelfluid und einer



Nebelmaschine erzeugt und mit geringem Druck durch den Ringspalt in Richtung der Lanzenspitze gepresst. Der Versuch wurde mittels Videokamera aufgenommen und dokumentiert.

In der Abb. 44 (Ausschnitt aus der Videoaufnahme) ist deutlich zu erkennen, dass der Nebel vom expandierten Luftstrahl über die Oberfläche des Kopfes bis in die Düsenöffnung eingezogen wird. Es sind keine Rückströmungen der expandierten Luft sichtbar. Damit wird gezeigt, dass der erhoffte Effekt, die Düsen (und in diesem Beispiel sogar den ganzen Kopf) durch den Ringspalt zu schützen, zumindest grundsätzlich möglich ist. Es muss sich aber erst zeigen, ob diese Vorgänge auch im Bereich des Lanzenkopfes im LD Konverter bei dem der Strömungsverhältnissen an der Außenseite des LD- Lanzenkopfes (Rauch, Gase und Schlacke) so stattfinden.

Durch Verhindern des Ansaugens der Umgebungsmedien an und in die Sauerstoffdüse könnten diese Beanspruchungen in Ihrer Intensität gemindert oder sogar komplett eliminieren werden. Der Lösungsweg einer Ringspaltdüse in Kombination mit Schutzgas wird in nächstem Kapitel im Detail beschrieben.



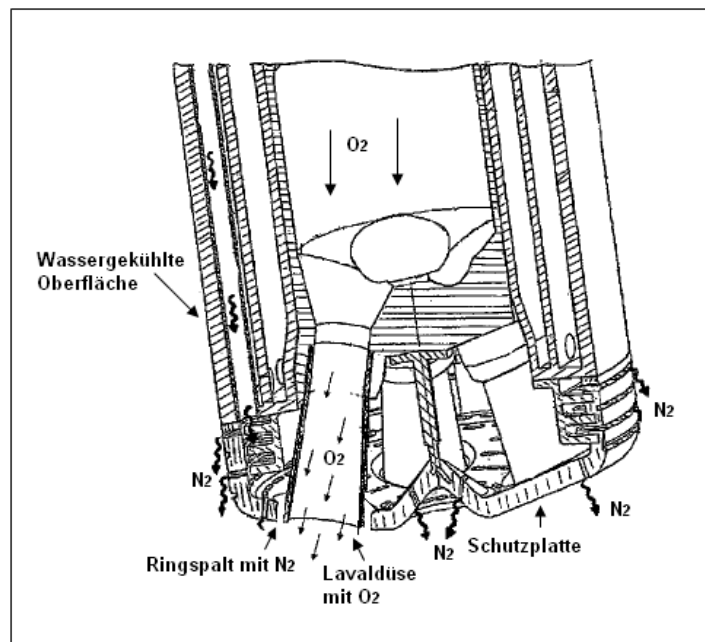
**Abb. 44:** Herausströmen und das Miteinziehen der Gase aus einem Ringspalt durch Strömung des Gases aus der Düse. Durch ein Nebelfluid wird deutlich gemacht, dass das Umgebungsmedium (Nebelfluid) durch den Druckluftstrahl mitgerissen wird, und dabei einen Film über dem Lanzenkopf bildet. Der Schutzfilm reicht bis an die Kante des Lanzenkopfes bzw. der Lavalldüse. Es sind keine Rückströmungen der austretenden Druckluft zu erkennen. Im neu entwickelten Lanzenkopf wird diese Idee gezielt verwendet, um den Verschleiß an der Düsenkante zu verringern und den Kopf vor Oxidation zu schützen.



## 4.2 Auslegung des Ringspaltes für Schutzgaszuführung

In einem Patent des Autors [38] wird dieses Prinzip für eine Sauerstoffblaselanze zur Stahlerzeugung vorgeschlagen. Wie in Abb. 45 zu sehen ist [38], wird diese Sauerstoffblaselanze mit einem Schutzelement am kopfseitigen Ende des Sauerstoffhauptrohres (einer Abdeckschale bzw. Schutzplatte) versehen, welche einen oder mehrere Auslässe aufweist, wobei an jedem Auslass eine Sauerstoffauslassdüse austauschbar befestigt ist. In diesen Schutzelement sind Durchlässe vorhanden, durch welche die Sauerstoffauslassdüsen von der Schale nach außen geführt sind, wobei diese Durchlässe jeweils so dimensioniert sind, dass zwischen den Sauerstoffauslässen und dem Schutzelement ein Spalt bzw. eine „Ringspaltöffnung“ verbleibt.

Durch diese Ringspaltöffnungen wird nun ein Schutzgas (Stickstoff oder Argon) geleitet.



**Abb. 45:** Sauerstofflanze mit teilweise keramischen Düsen und einem keramischen Schutzelement. Die keramischen Teile befinden sich durch das ausströmende Schutzgas (hier  $N_2$ ) in einer inerten Atmosphäre, aus [38].

Die Ringspaltöffnungen um die Sauerstoffdüsen und die Abdeckplatte sind so dimensioniert, dass ihre Gesamtoberfläche die Oberfläche einer herkömmlichen Sauerstoffdüse nicht überschreitet. Durch die Ringspalte soll das Schutzgas mit einem minimal erhöhten Druck  $P_o$  ( $P_o > P_u = 1,2 \text{ Bar}$ ) zum Umgebungsdruck  $P_u$  und einer Geschwindigkeit  $v_o$  ( $v_o = \text{von } 10 - 60 \text{ m/s}$ ) nach außen geleitet werden. Die Temperatur des Schutzgases beträgt dabei zwischen  $10^\circ \text{ C}$  und  $30^\circ \text{ C}$ . Die Schutzgasmenge soll nicht mehr als 10 % der Sauerstoffmenge während des LD- Prozesses betragen.



Durch das durch die Ringspaltöffnung strömende Schutzgas werden folgende Auswirkungen an der Düsenkante und auf das Blasverhalten erwartet:

Als erstes stabilisiert das austretende Schutzgas die Druckverhältnisse an der Düsenöffnung, da es mit konstantem Druck (konstanter Geschwindigkeit) eingepresst wird. Weiteres wird das Schutzgas durch den ausströmenden Sauerstoff angesaugt. Daher wird erwartet, dass das Schutzgas mit dem aus der Düse austretenden Sauerstoff an der Düsenkante in Kontakt kommt bzw. diesen umhüllt. Dadurch ist an der Düsenaustrittskante nicht mehr eine oxidierende sondern eher eine inerte Atmosphäre gegeben. Das Schutzgas soll dabei die Reaktionen zwischen dem Sauerstoff und Umgebungsmedien direkt an der Düsenkante verhindern oder zumindest minimieren (siehe Abb. 46). Weiteres wird erwartet, dass die Umgebungsmedien, die ebenfalls in die Sauerstoffdüse eingesaugt werden, durch das Schutzgas gekühlt werden.

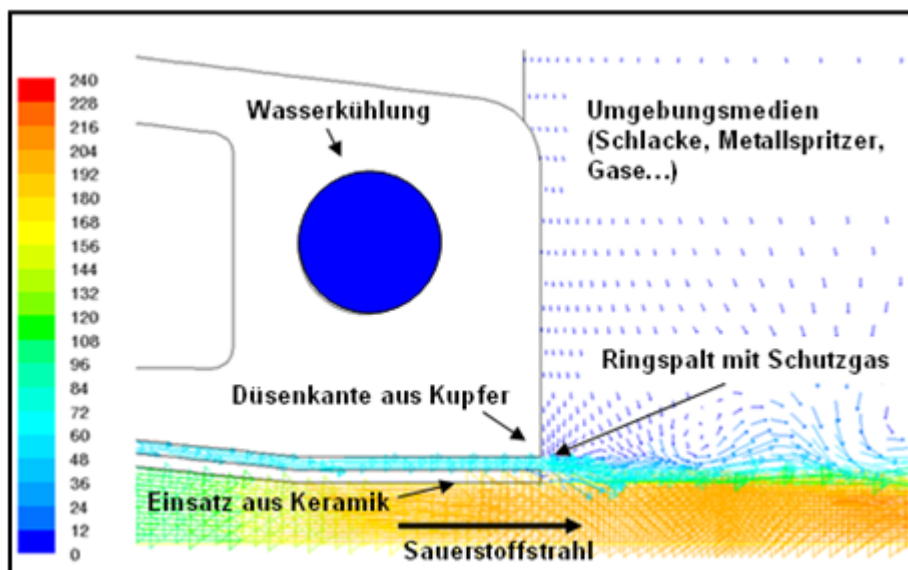


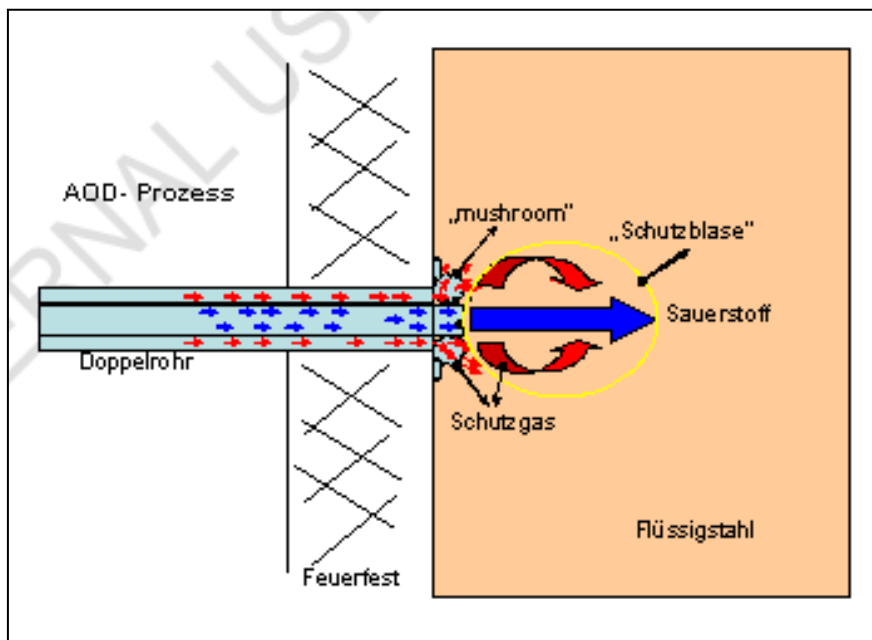
Abb. 46: CDF- Strömungssimulation der austretenden Gase bei einer Finexdüse mit einem Ringspalt, aus [30].

Das Ringspaltsystem kann auch bei den Sauerstoffdüsen für Finex und Corex Anlagen angewendet worden. Bei Finex und Corex Anlagen wird der Sauerstoff durch die Sauerstoffdüsen in den Reaktor eingeblasen. Diese Düsen sind wie auch die Lanzenköpfe beim LD- Prozess aus Kupfer gefertigt. Die Finexdüse hat aber keine Lavalform. Trotzdem wird durch die Düsen der Sauerstoff mit großem Druck 410 [kPa] und Strömungsraten von etwa 2000 [m<sup>3</sup>/h] gepresst. Die Verschleißbilder einer Finexdüse (Kupferkanten Erosion) sind mit jenen einer LD- Düse vergleichbar. Bei der Finexdüse wurde deswegen auch ein Ringspaltsystem eingeführt und getestet [39] um den Verschleiß zu verringern.



Vor dem Prototypentest beim Kunden, wurde bei Siemens VAI eine CDF-Strömungssimulation gemacht. Das Einsaugen der Umgebungsmedien, das in Abb. 33 dargestellt ist, wird durch das aus dem Ringspalt strömende Schutzgas in den Sauerstoffkanal verhindert (siehe Abb. 46). Wegen der kühlenden Wirkung des Schutzgases wird eine „Pilzbildung“ an den Düsenöffnungen erwartet.

Dieser Effekt wird auch beim AOD- Verfahren (englisch: Argon oxygen decarburization) für die Produktion vom rostfreiem Stahl) beobachtet [40]. Beim AOD- Verfahren wird der Sauerstoff zur Minimierung der schäumenden Schlacke (wie beim LD- Verfahren) auch seitlich durch die AOD- Düsen direkt in die Metallschmelze eingebracht. Diese sind ebenfalls als Ringspaltdüsen mit Schutzgas ausgeführt. Dabei wurde beobachtet, dass durch das ausströmende Schutzgas das flüssige Metall soweit abkühlt wird, dass das Metall an dieser Stelle erstarrt und eine pilzähnliche Form annimmt. Daher wird dieser Effekt auch als „Pilzbildung“ oder „Mashrooms“ bezeichnet. Interessant dabei ist auch, dass diese metallischen Pilze die umgebende feuerfeste Ausmauerung vor weiteren Kontakt mit der umgebenden metallischen Schmelze und damit vor eventuellen Reaktionen bzw. zu erwartendem Verschleiß dauerhaft schützen. Die Pilze sind sehr porös, sodass das Schutzgas ungehindert durch die kleinen Poren austreten kann (siehe Abb. 47 und Abb. 48).



**Abb. 47:** Schematische Darstellung des Pilzbildung an der Düsenausgang beim AOD- Prozess.





Abb. 48: Pilzbildung an den Düsenausgängen beim 180t AOD- CARINOX, IBN 2005.

In [41] wurde der Einfluss des Sauerstoffstrahles auf die Strömung des Schutzgases untersucht, und eventuelle metallurgische Auswirkungen auf den Prozess, bzw. das Blasverhalten und die Qualität des Stahles analysiert. Ergebnisse sind in Abb. 49 dargestellt.

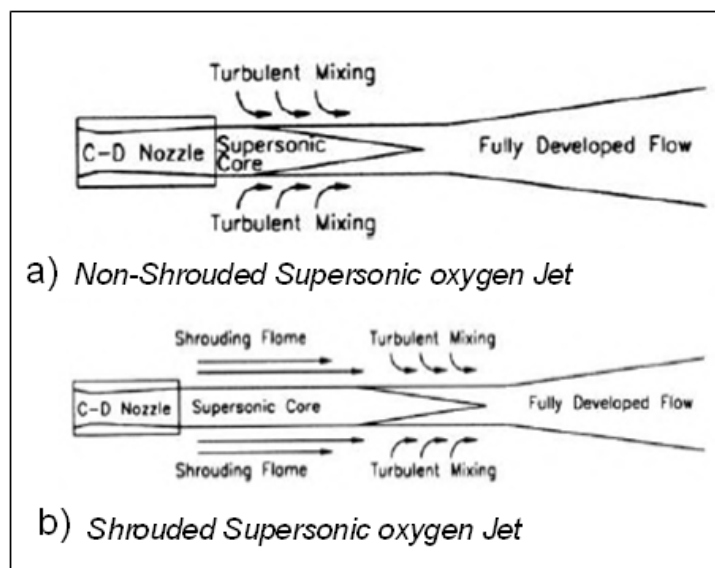


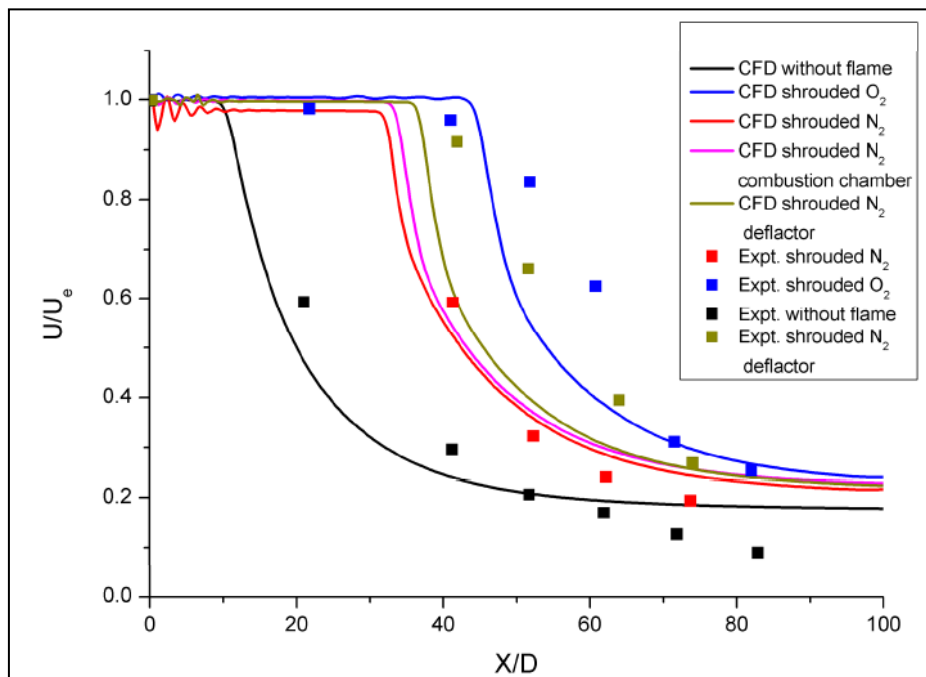
Abb. 49: Auswirkungen der zusätzlich erzeugten Flame auf die Intensität des Impulses des Sauerstoffes bei einer Lavaldüse, aus [41]. Die normale Situation an einer Laval Düse ist in (a) dargestellt. Durch Einblasen zusätzlicher Brennstoffe über einen Ringspalt verlängert sich der Bereich der laminaren Strömung mit Überschallgeschwindigkeit (b).

An den Rändern des Überschallstrahles „kuppelt“ die Turbulenz das umgebende Gas ein. Dies bewirkt, dass sich der Sauerstoffstrahl verbreitert. Als Folge verringert sich die Geschwindigkeit des Strahls und seine Eindringtiefe in das flüssige Metall (siehe Abb.49.a) [41]. Weiteres ist in der Abb.49.b das Einhüllen des Sauerstoffstrahles durch den zusätzlich






erzeugten Flamen dargestellt. Dies verringert die Turbulenz an den Rändern des Sauerstoffstrahls und erhöht damit seine Geschwindigkeit und Eindringtiefe in das flüssige Metall [41]. Die für die metallurgischen Vorgänge beim LD- Verfahren so wichtige Impulserhöhung und die damit verbundene Eindringtiefe des Sauerstoffes in das flüssige Metall wurde gemessen und publiziert, Abb.50 [41].



**Abb. 50:** Gemessene Sauerstoffimpulslängen ( $X/D$ ) bei einer Lavaldüse mit gleichen Ausgangsbedingungen ( $U/U_e$ ). Die normale Situation an einer Lavaldüse ist mit schwarzer Linie und Punkten dargestellt, die Verlängerung der laminaren Strömung bzw. der Sauerstoffimpulslänge durch den zusätzlich erzeugten Flamen (der den Sauerstoffstrahl Einhüllt) ist mit blauer Linie und Punkten Dargestellt. Die roten Linien und Punkte zeigen die Verlängerung der laminaren Strömung des Sauerstoffstrahles bei seiner Umhüllung mit Schutzgas [41].


Aus der Abb. 50 ist zu entnehmen, dass der Impuls des Sauerstoffstrahles welches mit Schutzgas ( $N_2$ ) umhüllt ist um etwa das Doppelte (circa 35  $X/D$ ) zunimmt im Vergleich mit der normalen Situation (circa 15  $X/D$ ). Bei einer Umhüllung des Sauerstoffstrahles mit einem heißen Medium (Oxygen und Öl) könnte sich die Länge des Impulses des Sauerstoffstrahles sogar vervierfachen (circa 50  $X/D$ ). [41].

Diesen Erkenntnissen kommt bei der Sauerstofflanze doppelte Bedeutung zu. Zum einem kann bei gleichbleibender Position der Lanze der Sauerstoffstrahl tiefer in das flüssige Metall eindringen. Damit werden die Reaktionsgeschwindigkeit und das Reaktionsvolumen zwischen dem Sauerstoff und der metallischen Schmelze vergrößert. Zweitens kann der Abstand der Sauerstofflanze zum Badniveau vergrößert werden. Damit sind an der Lanzenspitze

<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik Montanauniversität A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH) Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	---

niedrigere Temperaturen (Strahlung vom Metallbad) zu erwarten. Weiteres wäre die damit verbundene Verbärung der Lanze viel geringer.

Zusammenfassend kann man sagen, dass durch die Einführung einer Ringspaltdüse bzw. das Miteinführen von Schutzgasen der LD- Prozess positiv beeinflusst wird. Die Komponenten werden besser geschützt und der Prozess kann bewusst gesteuert werden. Weiteres kann das Schutzgas die Reaktionen zwischen dem Sauerstoff und Umgebungsmedien direkt an der Düsenkante verhindern oder zumindest verringern.

<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik</b> <b>Montanauniversität</b> <b>A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH)</b> <b>Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	--

## 5. Allgemeine Überlegungen zum Einsatz von Hochleistungskeramik

Wie im Kapitel 4 beschrieben kann das Einsaugen von Umgebungsmedien durch die Ringspaldüse und das Schutzgases verringert oder sogar weitgehend vermieden werden.

Durch die hier gewählte Anordnung bleiben die entwickelten Düsen und die zu ihren Schutz vorgelagerten Platten von den wassergekühlten Kupferteilen getrennt. Sie werden zwar teilweise noch durch ausströmende Gase (Sauerstoff und Schutzgas) gekühlt, bleiben aber weitgehend den in den vorherigen Kapiteln beschriebenen Beanspruchungen ausgesetzt. Diese sind von allen die Strahlung durch das Stahlbad (Temperatur), der Kontakt mit der Schlacke (Konvektion, chemische Reaktionen) und die sauerstoffreiche, oxydierende Umgebung. Außerdem sind die Teile auch beim Ein- und Ausfahren der Lanze in den Konverter starken Thermowechselbelastungen ausgesetzt (siehe Kap. 2.).

Die Werkstoffe bzw. die Produkte aus Keramik, die in dieser Umgebung bereits Verwendung finden, sind die feuerfesten Keramiken der Konverterausmauerung. Diese Anwendung haben die feuerfesten Keramiken ihren außergewöhnlichen Eigenschaften zu verdanken. Zum einen wird bei den LD- Verfahrensschritten eine sehr hohe Temperatur entwickelt, so dass der Einsatz von Metallen nicht oder nur mehr mit intensiver Kühlung möglich ist. Die Keramiken weisen dagegen auch bei hohen Temperaturen noch hohe Festigkeiten und Härten auf. Zweitens stehen diese Werkstoffe in ständigem Kontakt mit flüssigem Eisen, Stahl und Schlacke bzw. sind sie starken korrosiven Bedingungen ausgesetzt. Die Korrosionsbeständigkeit keramischer Werkstoffe ist in diesen Fällen der von Metallen weit überlegen. Die Feuerfestkeramik korrodiert nämlich nicht wie die Metalle unter Auflösung elektrochemisch, wenn sie mit einem edleren Stoff in Kontakt kommt. Die Korrosion der Keramiken erfolgt chemisch, wenn die Bedingungen für eine chemische Reaktion günstig sind, das heißt die Keramiken lösen sich auf. Die feuerfesten Keramiken der Konverterausmauerung haben in der Regel eine lange Einsatzdauer, da sie chemisch sehr stabil sind. Zudem ist die Benetzbarkeit der Keramiken durch die metallischen Schmelzen im allgemeinen sehr gering. Die wichtigsten Beanspruchungen der feuerfesten Zustellung eines LD- Konverters sind in Abb. 51 dargestellt.

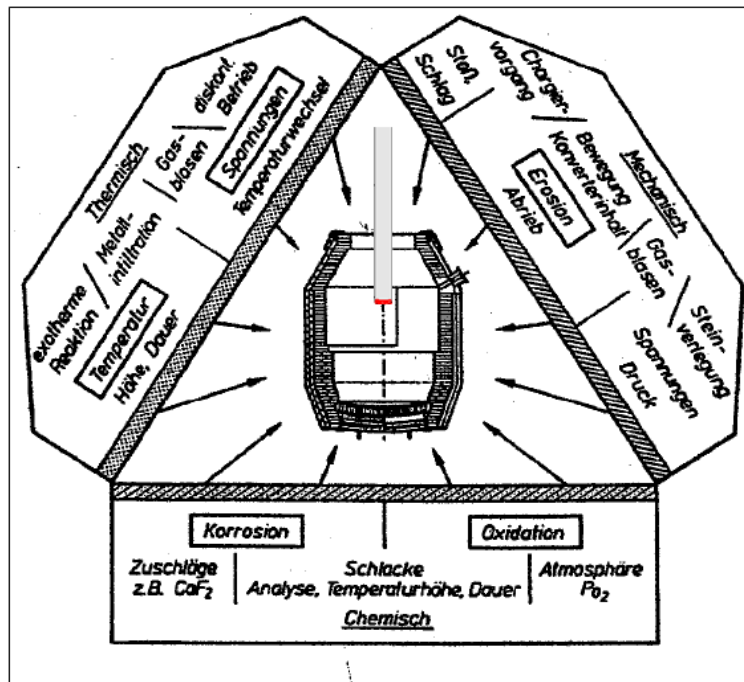



Abb. 51: Beanspruchung der Zustellung im LD- Konverter, aus [34].

Alle diese Beanspruchungen treten während des Prozesses fast immer in Kombination auf. Bei der Auswahl eines geeigneten keramischen Werkstoffes für diesen Anwendungsfall müssen nun aufgrund der speziellen Eigenschaftskombination alle auftretenden chemischen, thermischen und mechanischen Beanspruchungen berücksichtigt werden. Außerdem soll bei der Werkstoffauswahl, insbesondere bei den großen Teilen, auf die Herstellungs- und Verbindungsmöglichkeiten Bedacht genommen werden.

Je nach Zusammensetzung und Aufbereitung der verwendeten Rohmaterialien sowie nach Formgebung und Art des Brennens können die Eigenschaften der jeweiligen Erzeugnisse dem beabsichtigten Verwendungszweck im hohen Maße angepasst werden. In Abb. 52 sind die wichtigsten Eigenschaften von technischer Keramik gegenüber Metallen und Polymeren zum Vergleich dargestellt. Dieser Vergleich, erleichtert die Einschätzung des Eigenschaftsprofils dieser Werkstoffe.

<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik Montanauniversität A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH) Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	--

	Keramik	Metall	Polymere
Härte	↑	↓	↓
E-Modul	↑	↑	↓
Hochtemperaturfestigkeit	↑	↓	↓
Thermische Ausdehnung	↓	↑	↑
Duktilität	↓	↑	↑
Korrosionsbeständigkeit	↑	↓	↓
Verschleißbeständigkeit	↑	↓	↓
Elektrische Leitfähigkeit	↔	↑	↓
Dichte	↓	↑	↓
Wärmeleitfähigkeit	↔	↑	↓
↑ Tendenz zu hohen werten		↓ Tendenz zu niedrigen werten	

**Abb. 52:** Vergleich der Eigenschaften von Keramiken, Metallen und Polymeren, aus [42].

Neben den angeführten Beanspruchungen, denen der Werkstoff standhalten muss, sollen bei seiner Auswahl auch die weiteren Aspekte wie: Preis, Lieferzeiten, Herstellungsqualität, Gewicht und die Handhabung in Betracht gezogen werden.

### 5.1 Thermische Beständigkeit

Wie schon in Kapitel 5 beschrieben, werden die hier auszuwählenden Werkstoffe bei sehr hohen Temperaturen eingesetzt (1300° C- 1650° C). Während ihres Einsatzes soll ihre thermische Beständigkeit in chemischer und mechanischer Hinsicht beurteilt werden. Diese Werkstoffe dürfen sich nicht zersetzen, verflüssigen oder verdampfen. Außerdem sollen sie auch formstabil sein, was im Allgemeinen mit einer hohen Kriechbeständigkeit gleichzusetzen ist.

Hinsichtlich der maximal möglichen Einsatztemperatur ist selbstverständlich die Schmelztemperatur eine absolute Grenze. In Abb. 53 sind einige Schmelz- bzw. Zersetzungstemperaturen hoch schmelzender Phasen dargestellt.

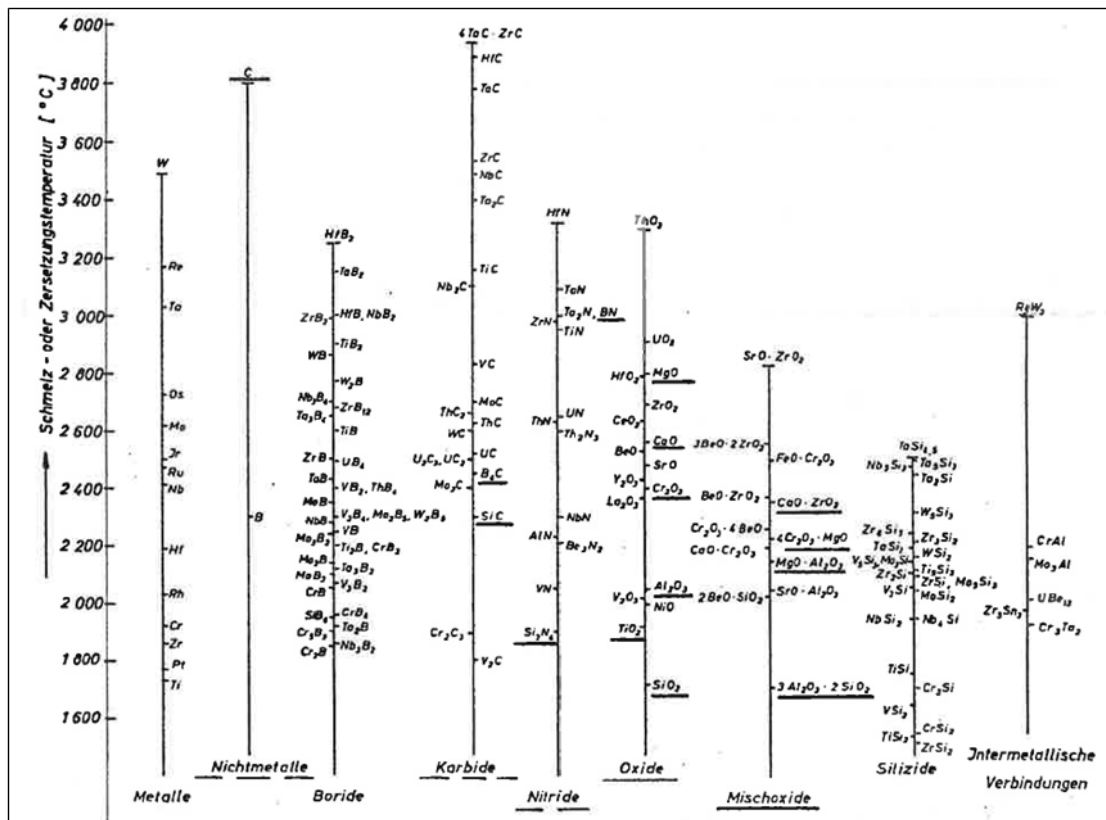



Abb. 53: Schmelz- oder Zersetzungstemperaturen hoch schmelzender Phasen. Feuerfeste Werkstoffe sind unterstrichen (vor allen Oxide und Mischoxide), aus [42].

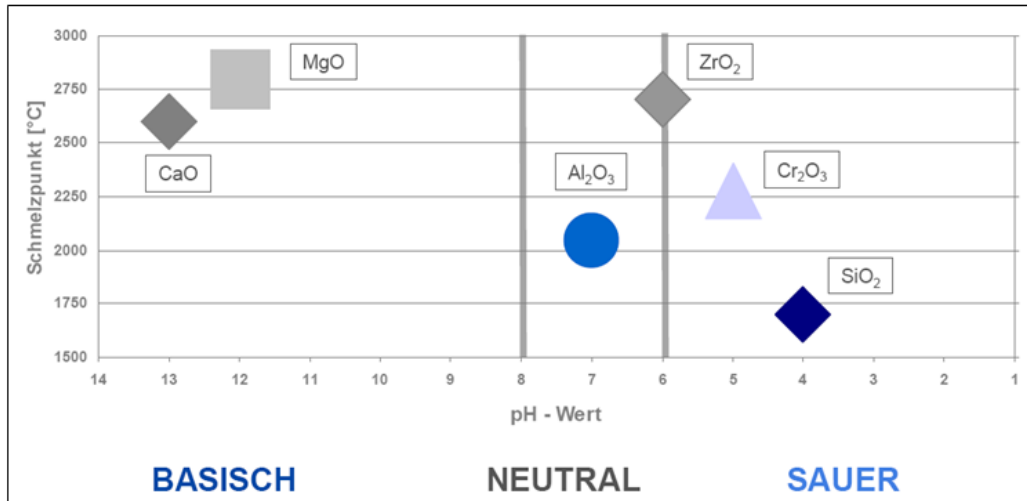
Während des Einsatzes muss die Festigkeit der verwendeten Werkstoffe bei den Einsatztemperaturen (1350° C- 1650°C) aufgrund der thermischen Beanspruchungen, hinreichend hoch bleiben. Dafür müssen diese Werkstoffe aber deutlich höhere Schmelzpunkte als die zu produzierenden Produkte (z.B. Stahl) aufweisen.

## 5.2 Chemische Beständigkeit

Abgesehen von Sonderwerkstoffen handelt es sich bei Feuerfestmaterial und bei Schlacken im Wesentlichen um Oxide oder oxydische Verbindungen. Diese werden in saure und basische feuerfeste Werkstoffe unterteilt.

Saure Phasen sind beispielsweise  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  und  $\text{ZrO}_2$ , basisch sind  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{MnO}$  und  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ . Zur Beurteilung ihrer Wechselwirkung mit Schlacken wird die Basizität (d.h. das Verhältnis der Gewichtsanteile von basischen zu sauren Bestandteilen) herangezogen: Einfache Basizität besteht bei:  $\text{CaO} / \text{SiO}_2$  und die erweiterte Basizität bei  $(\text{CaO} + \text{MgO}) / (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)$  [43]. Eine Einteilung einiger Feuerfestoxide nach ihren Schmelzpunkt und Basizität ist in der Abb.54 gegeben.

<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik</b> <b>Montanauniversität</b> <b>A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH)</b> <b>Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	--



**Abb. 54:** Einteilung der Feuerfestoxide nach Schmelzpunkt und Basizität, aus [44].

Die Wechselwirkung mit der Schlacke ist einer der wesentlichen Verschleißfaktoren von feuerfesten Auskleidungen bei der Stahlerzeugung. Die Schlacke hat damit nicht nur eine Bedeutung für den metallurgischen Prozess, sondern auch für den Feuerfestverschleiß.


Das Verschleißverhalten der feuerfesten Produkte ist komplex und wird sowohl von den Produkteigenschaften als auch von den Bedingungen bei der Anwendung bestimmt, wie Temperaturen, Stahlsorten und Schlacken oder Ofentyp und lokaler Atmosphäre. Kommt es zu einem direkten Kontakt zwischen der Schlacke und der feuerfesten Auskleidungen, so ist mit ihren Wechselwirkungen und damit verbundenen Verschleiß zu rechnen.

Durch Verhindern des Kontaktes zwischen der Umgebungsmedien und feuerfesten Auskleidungen könnten diese Wechselwirkungen in Ihrer Intensität gemindert oder sogar komplett eliminieren werden. Der Lösungsweg bzw. die Verwendung vom Inertgasen als Schutzgasen für die Oberflächen der Keramiken wird in dieser Arbeit weiter verfolgt.

### 5.3 Thermoschock- und Temperaturwechselbeständigkeit

Unter Thermoschock versteht man die schnelle, schockartige Veränderung der Temperatur eines Materials oder Bauteils. Es entstehen Temperaturunterschiede im Bauteil und es kommt zu thermischen Dehnungen, welche in der Regel auch thermische Spannungen hervorrufen. Sie hängen von den geometrischen und thermischen Randbedingungen und von den physikalischen Größen Elastizitätsmodul  $E$ , Poisson- Zahl  $\nu$ , Dichte  $\rho$ , Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$ , Wärmeausdehnung  $\alpha$  und der spezifische Wärme  $c_p$  ab, [45].



<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik Montanauniversität A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH) Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	--

Der unendlich harte Thermoschock entsteht, wenn sich die Oberfläche eines Bauteiles plötzlich von  $T_0$  auf  $T_1$  ( $T_0 > T_1$ ) ändert (bei einem unendlich großen Wärmeübergangskoeffizienten  $h$ ). Die größte Zugspannung  $\sigma$  tritt hier an der Oberfläche des Bauteils auf. An einer ebenen Oberfläche ist sie gegeben durch;

$$\sigma^\infty = \frac{E\alpha(T_0 - T_1)}{(1 - \nu)}$$

Zum Bruch des Teiles kommt es, wenn die Zugspannung  $\sigma$  die Zugfestigkeit  $\sigma_B$  überschreitet:  $\sigma^\infty \geq \sigma_B$ . Durch Einsetzen von  $\sigma$  in obige Gleichung kann die maximal zulässige Temperaturdifferenz  $(T_0 - T_1)_{\max}$  an der Oberfläche des Bauteiles berechnet werden. Diese wird als erster Thermoschockparameter  $R$  bezeichnet:

$$R = (T_0 - T_1)_{\max} = \frac{\sigma_B(1 - \nu)}{E\alpha} \quad [\text{K}]$$

Werkstoffe mit hoher Festigkeit, kleinem Wärmeausdehnungskoeffizienten und niedrigem E-Modul sind demnach sehr thermoschockbeständig.


In der Praxis tritt aber ein unendlich hoher Wärmeausdehnungskoeffizient nicht auf. Die Härte eines Thermoschocks wird mit der Biot Zahl ( $\beta = \frac{hr}{\lambda}$ ;  $r$  ... charakteristische Abmessung,  $h$  ... Wärmeübergangskoeffizient und  $\lambda$  ... Wärmeleitfähigkeit) beurteilt. Bei einem harten Thermoschock ist die Biot- Zahl ( $\beta > 50$ ) und die Wärmespannungen sind  $\sigma_{th} \geq 0,7\sigma_B$ . Bei milden Thermoschocks ( $\beta < 1$ ) ist die Spannung näherungsweise zur Biot Zahl proportional:  $\sigma_{th} \geq 0,2\beta\sigma_B$ . Für beliebige Biotzahlen kann die beim Thermoschock auftretende thermische Spannung

$$\sigma_{th} = \frac{E\alpha(T_0 - T_1)}{(1 - \nu)} \cdot f(\beta)$$

auch analytisch ermittelt für Körper einfacher Geometrie ermittelt werden, wenn alle Werkstoffparameter als temperaturunabhängig angenommen werden. Im allgemeinen Fall müssen aber numerische Berechnungen durchgeführt werden. Details zur Ermittlung der Wärmespannungen können in [46] nachgelesen werden.

Mit diesen Parametern können verschiedene Werkstoffe untereinander verglichen bzw. ausgewählt werden. Um aber eine genauere Aussage darüber treffen zu können, muss auch die Geometrie des Bauteils berücksichtigt werden.

Durch häufige Temperaturwechsel kann es zu thermischer Ermüdung der Werkstoffe kommen.

<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik</b> <b>Montanauniversität</b> <b>A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH)</b> <b>Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	--

## 6. Konstruieren mit Keramik

Keramiken sind sehr spröde Werkstoffe. Ihre Bruchzähigkeit liegt weit unter dem Wert von  $20 \text{ MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$  [47], der eine Untergrenze für die Zähigkeit von vielen metallischen Konstruktionen darstellt. Aus diesem Grund müssen bei der Konstruktion mit Keramiken spezielle Regeln beachtet werden [48]. Für einen erfolgreichen Einsatz von Keramiktteilen genügt es in der Regel nicht, ein vorhandenes Metallteil 1:1 aus einem keramischen Werkstoff zu fertigen, d.h. ein metallisches durch ein keramisches Teil austauschen. Vielmehr ist es notwendig, das gewünschte Teil umzukonstruieren und auch die umgebende Konstruktion des geänderten Teiles an die neuen Bedingungen anzupassen. Auch bei den mit den Keramiken verbundenen (oft metallischen) Teilen müssen in der Regel konstruktive Änderungen vorgenommen werden, um auf die Sprödigkeit der Keramik einzugehen.


Es ist sehr wichtig sich zu vergewissern, insbesondere bei den Erst-Überlegungen über das Design eines Teiles, dass die Beanspruchungen (thermische, chemische und mechanische) in der Vorarbeit möglichst genau festgelegt sind. Falls dies nicht möglich ist (z.B. wegen hoher Temperaturen), sollten Vorversuche mit ausgewählten Werkstoffen unter den realen Bedingungen durchgeführt werden. Dies ist in den meisten Fällen besser als Modellrechnungen, da bei den metallurgischen Prozessen die für die Modellrechnungen benötigten Daten oft fehlen oder mangelhaft sind. Dies kann zu falschen Ergebnissen und dadurch zu irreführenden Entscheidungen führen. Es hat sich auch gezeigt, dass bei den verwendeten Hochtemperaturwerkstoffen die von den Herstellern zur Verfügung gestellten Datenblätter häufig falsch sind. Daher sollten alle benötigten Daten durch eigene Tests überprüft werden.

Eine weitere Schwierigkeit besteht darin, dass solche Versuche im Labor an kleinen geometrisch einfachen Proben unter idealisierten Bedingungen durchgeführt werden. In der Praxis sind die Teile häufig viel größer, geometrisch kompliziert, und es treten oft mehrere Beanspruchungen gleichzeitig auf.

Wenn man also ein neues Teil aus Keramik konstruieren- oder ein aus metallischen Werkstoffen bestehendes Teil ersetzen möchte (was öfter in der Praxis vorkommt) so sollte man nach der Fertigstellung der Prototypen erneut die gesamte Konstruktion auf Sicherheit und Funktionalität bewerten. Selbstverständlich sollte man dabei den keramischen gegenüber den bestehenden metallischen Teilen besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden.

Eine aussichtsreichste Möglichkeit, die Schadenstoleranz keramischer Werkstoffe zu erhöhen, bietet oft der Einsatz keramischer faserverstärkter Verbundwerkstoffe, welche eine sehr große Zähigkeit aufweisen.

Auch für diese auf dem Markt relativ neuen Werkstoffe gelten oft die allgemeinen Konstruktionsprinzipien. Einige davon, welche insbesondere in dieser Arbeit beachtet wurden, werden in die nächsten Kapitel beschrieben.

<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik Montanauniversität A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH) Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	--

## 6.1 Allgemeine Konstruktionsprinzipien für keramische Werkstoffe

Bei der Konstruktion mit keramischen Werkstoffen sind Spannungskonzentration nach Möglichkeit zu vermeiden [46]. Spannungsspitzen können bei den Keramiken (in der Regel) nicht wie bei Metallen durch plastisches Fließen abgebaut werden. Wenn die Informationen über die genaue Funktion des zu entwerfenden Bauteils und die Eigenschaften der in Frage kommenden keramischen Werkstoffe beschafft wurden, kann man mit Hilfe von Finite Elemente- Berechnungen in Verbindung mit Bruchwahrscheinlichkeits- und Lebensdauervorhersagen die Konstruktion optimieren [49]. Zu beachten ist dabei, dass die aus der Keramik konstruierten Teile möglichst mit Druck- und so wenig wie möglich mit Zug beansprucht werden sollen, da die Druckfestigkeit von Keramiken in der Regel 5 – 20 mal höher als die Zugfestigkeit ist.

Es ist auch zu beachten, dass auch bei einer lokalen Druckbeanspruchung Zugspannungen auftreten können. Hertz untersuchte das Problem einer Kugel auf einer Halbebene. „Am Rand der Kontaktzone entstehen in der Halbebene Zugspannungen, die näherungsweise 1/6 der mittleren Flächenpressung betragen“ [50];


$$\sigma_{\perp} = \frac{F}{\pi a^2} \quad \text{und} \quad \sigma_{\parallel} \approx \frac{1}{6} \frac{F}{\pi a^2} .$$

Der Radius der kreisförmigen Kontaktfläche ist  $a$  .

Einige der Möglichkeiten zur Belastbarkeitssteigerung der Bauteile aus Keramik sind:

### Konstruktive Gestaltung [46]:

- Druckspannungen im keramischen Bauteil sind zu bevorzugen. Dies kann erreicht werden durch entsprechende
  - Festlegung des Kraftangriffes,
  - Bauteilgestaltung,
  - Füge - und Kontaktstellen.
- Aufbau einer Druckvorspannung für die Kompensation von betriebsmäßigen Zugkräften, z. B. durch
  - Metallguss der Keramik,
  - Aufschumpfen von Buchsen/Hülsen auf rotationssymmetrische keramische Teile,
  - Verspannen im Montagezustand,
  - Technologische Maßnahmen

<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik Montanauniversität A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH) Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	--

- Vergrößerung der Krafteinleitungsfläche, Vermeidung von Spannungsspitzen.
- Großvolumige Teile in mehrere zerlegen (Modulbauweise). Beachtung des Volumeneinflusses auf die Festigkeit, besonders für Weibull- Modul  $m < 20$ ,
- Vermeiden von scharfen Kanten und Ecken,
- Vermeiden von plötzlichen Querschnittsveränderungen,
- Auflage- und Einspannbedingungen genau definieren, Krafteinleitung möglichst nicht punkt- oder linienförmig, sondern flächenförmig vornehmen
- Thermische Dehnungen möglichst nicht behindern

#### **Änderung des Werkstoffes:**

- Werkstoffe mit höherer Festigkeit einsetzen,
- Werkstoff mit größerem  $K_{Ic}$  - Wert (Bruchzähigkeit) einsetzen,
- Dispersionswerkstoff verwenden (z. B. Zirkoniumoxid verstärktes Aluminiumoxid),
- Faserverstärkte Werkstoffe einsetzen.

#### **Technologische Maßnahmen:**

- Bearbeitungsrichtung nur parallel zur maximalen Beanspruchungsrichtung,
- Erzeugung von Druckspannungen im Oberflächenbereich,
- Umwandlungsvorgänge im Kristallgitter steuern und nutzen, insbesondere bei und mit Zirkoniumoxid.

Die aus diesen Grundsätzen ergebenden Regeln, die für diese Arbeit besonderes relevant waren, werden in Abb. 55 und Abb. 56 mit Beispielen belegt:

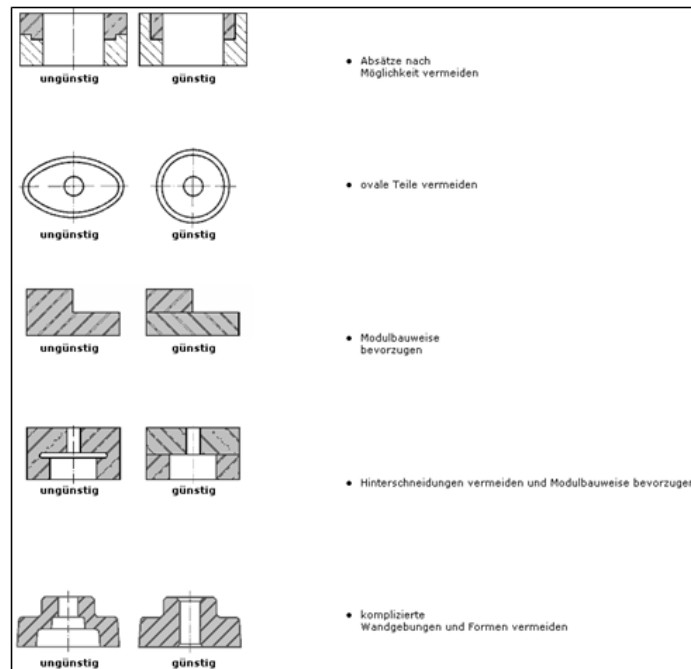


Abb. 55: Einfache Formen anstreben, aus [47].

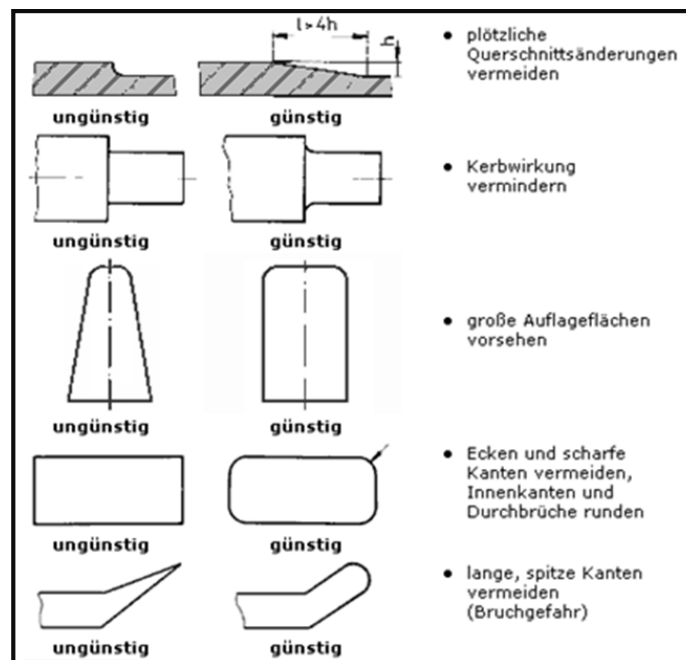



Abb. 56: Beispiele für günstige und ungünstige Bauteilgestaltung, aus [47].

Bei der Konstruktion muss auch auf die Herstellungsmethode der Teile Rücksicht genommen werden. Beim Sintern kommt es zu einer starken Schwindung, sodass Toleranzen häufig nicht eingehalten werden können und Teile nachbearbeitet werden müssen. Die Oberflächenqualität kann durch Schleifen und Polieren verbessert werden.

<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik Montanauniversität A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH) Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	--

Für die kostengünstige Herstellung der Teile ist es von großer Bedeutung, die Formgebung möglichst endformnahe zu gestalten, so dass die Bearbeitung möglichst gering gehalten werden kann. Die Herstellkosten eines Bauteils aus technischer Keramik setzen sich folgendermaßen zusammen [47]:

- Materialkosten,
- Formgebungskosten,
- Endbearbeitungskosten,
- Brennkosten,
- Prüfkosten und
- Allgemeinkosten.

Diese Herstellkosten können stark reduziert werden, wenn man eine Konstruktion die eine Serienproduktion der Teile ermöglicht gezielt anstrebt.

## 6.2 Verbindungstechniken

In der Praxis werden die keramischen Teile meistens in Kombination mit anderen Werkstoffen eingesetzt. Um sie richtig miteinander einsetzen zu können müssen sie auch „keramigerecht“ verbunden werden. Die Techniken für Keramik-Keramik- bzw. Keramik-Metall- Verbindungen sind noch nicht ausgereift. Trotzdem gibt es schon vielversprechende Ansätze, die auch für den Hochtemperaturbereich anwendbar sind. Es muss gelingen, das keramische Bauteil für alle Betriebssituationen zuverlässig ins Gesamtsystem zu integrieren, damit die besonderen Eigenschaften zu tragen kommen können, die für die Verwendung der Keramik ausschlaggebend waren.

Besonders sind dabei die thermischen Ausdehnungskoeffizienten der zu verbindenden Materialien zu beachten, z.B. wenn sich die Betriebstemperatur von der Verbindungstemperatur unterscheidet oder starke Temperaturwechsel auftreten. Es ist günstig, wenn die Ausdehnungskoeffizienten aller eingesetzten Werkstoffe möglichst ähnlich sind. Die in der Verbindung auftretenden Spannungen dürfen nicht zum Versagen der Verbindungen oder der verbundenen Teile führen. Meist sind die thermischen Ausdehnungskoeffizienten der Keramiken (viel) kleiner als die der Metalle. Daher soll bei der Gestaltung der Verbindungen der Konstrukteur werkstoffgerecht vorgehen und folgende Grundsätze beachten [45], 46]:

- Vermeide Spannungsspitzen und Punktlasten durch
  - große Krafteinleitungsflächen,
  - parallele Kontaktflächen,





- elastische Zwischenlagen und
- Kraftfluss ohne scharfe Umlenkung.

Zur Gestaltung von Verbindungen werden einige Grundregeln und einige typische Problemstellungen in Abb. 57 vorgestellt:

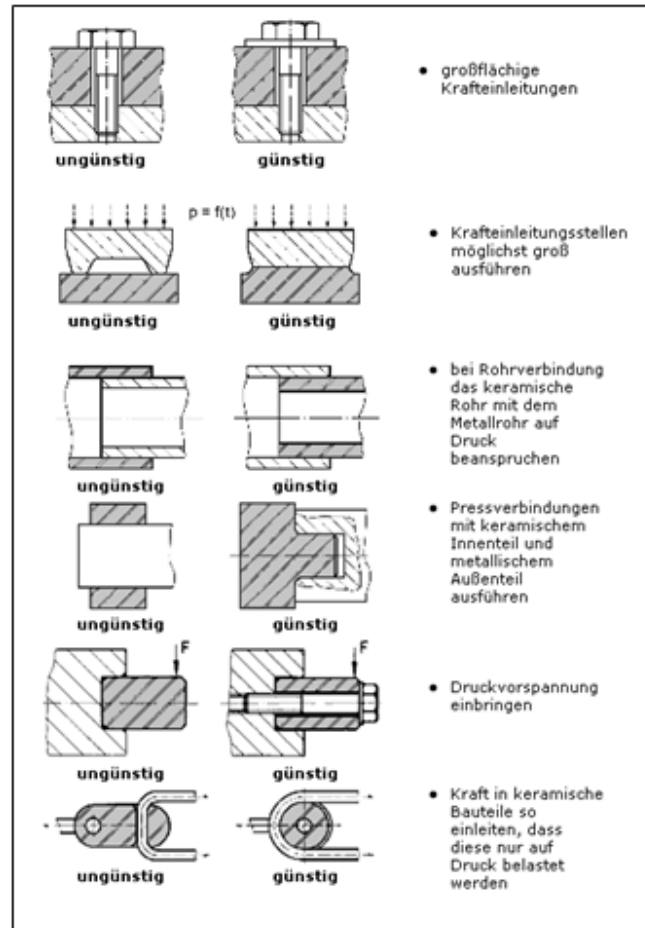


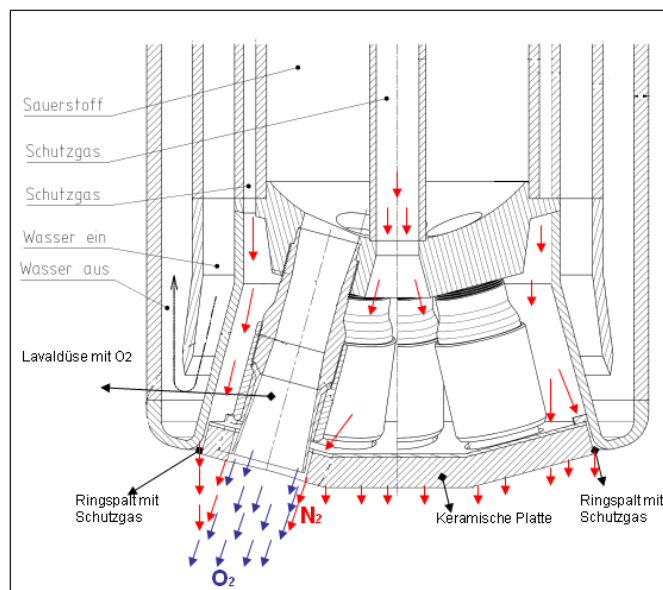
Abb. 57: Beispiele für günstige und ungünstige Krafteinleitungen, nach [45].

Weitere Möglichkeiten zum Verbinden von Teilen sind das Kleben und das Löten. Klebstoffe und insbesondere die Lötmittel sind aber meist nur bis zu bestimmten (eher geringen) Temperaturen einsetzbar. Es gibt aber keramische Klebstoffe (im wesentlichen Mörtel), die bis etwa 1500°C einsetzbar sind. Diese können aber nur sehr geringe mechanische Beanspruchungen ertragen.




## 7. Untersuchungen zur Werkstoffauswahl

Abb. 58 zeigt eine schematische Darstellung des neuen Lanzenkopfes, der mit Ringspalten und einer Stirnplatte versehen ist. Der Lösungsansatz mit der Ringspaldüse (siehe Kapitel 5) hat auf die Auswahl der Werkstoffe einen großen Einfluss. Zum Einem sind die Düsen und die Platten nun von den wassergekühlten Teilen getrennt worden und werden somit nicht mehr durch Wasser gekühlt. Zum Zweiten wird durch die Ringspalte ein Inertgas in deren Umgebung gedrückt. Dieses soll, wie in Abb. 58 dargestellt, vom ausströmenden Sauerstoff mitgezogen werden. Dadurch soll es die Außenseiten der Düsen und die Innenseite der Schutzplatte möglichst vollkommen ummanteln. Auch die Außenseite der Stirnplatte soll durch das Inertgas bedeckt werden. Dadurch wird durch das ausströmende Schutzgas eine (zumindest geringfügige) Kühlung der keramischen Teile bewirkt. Die Stirnplatte hat die Aufgabe, die dahinter liegenden Teile vor den hohen Temperaturen und der chemisch aggressiven Umgebung zu schützen.



**Abb. 58:** Schematische Darstellung des neuen Lanzenkopfes mit Lavaldüsen, Ringspalten und keramischen Schutzplatten. Schwarze Pfeile zeigen den Strom des Kühlwassers, blaue Pfeile zeigen den Sauerstoffstrom und rote Pfeile den Strom des Schutzgases an.

Bei der Auswahl der Werkstoffe hat nicht nur dieser Lösungsansatz (Schutzgas) eine große Rolle gespielt. Auch die in den vorherigen Kapitel beschriebenen Kriterien zur Materialauswahl sowie die Konstruktionsmöglichkeiten, die Verbindungsmöglichkeiten, die Wirtschaftlichkeit und die neuen Funktionen der Werkstoffe in der Gesamtkonstruktion wurden dabei berücksichtigt.

<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik Montanauniversität A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH) Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	--

## 7.1 Werkstoffauswahl für die Lavaldüsen

Der Sauerstoff wird durch die Lavaldüsen gepresst. Da die Lavaldüsen nun nicht mehr wassergekühlt sind, können sie sich im Wärmestrom der Umgebung stark erwärmen. Aufgrund der Expansion des Sauerstoffs in den Lavaldüsen kommt es aber zumindest auf den Innenwänden der Düsen zu einer (geringfügigen) Kühlung. Insgesamt ist aber zu erwarten, dass die Temperatur an den Düsen spitzen etwa gleich hoch wie in der Umgebung (1300 – 1500°C) werden kann. Aus diesem Grund sind Kunststoffe und Metalle als Düsenwerkstoff nicht geeignet.


Die Innenseiten der Düsen befinden sich durch den Kontakt mit dem Sauerstoff in einer stark oxidierenden Umgebung. Daher kommen auch oxidierende Keramiken wie z.B. Karbide und Nitride als Düsenwerkstoff nicht in Frage.

Bei der Auswahl des Düsenwerkstoffs müssen auch noch Anforderungen wie die Verbindung der Düsen mit den sonstigen Metallteilen (thermische Dehnungen und Spannungen), sowie ihre leichte Auswechselbarkeit berücksichtigt werden. Das Material der Düsen muss daher temperaturwechselbeständig sein.

Das Material soll auch möglichst beständig gegen die Umgebungsmedien (Schlacken, Metallspritzer...) sein. Diese Forderungen sind de facto nicht gleichzeitig erfüllbar. Die Konstruktion der Düse mit dem Ringspalt soll den Kontakt der Düsen mit den Umgebungsmedien so weit wie möglich verhindern oder zumindest gering halten.

Das Material für die Düsen soll auch leicht formbar sein, sodass Teile mit einer sehr geringen Wandstärke (0.3 mm bis max. 3 mm sollten) herstellbar sind. Die Innenoberflächen der Düsen sollen wegen der turbulenten Strömung des Sauerstoffs möglichst glatt sein. Diese dünnwandige Kontur muss den Gasdrücken von 0,9 - 1,3 bar standhalten können. Dieser Forderung entsprechen vor allem Keramikfaserverbundwerkstoffe. Diese Werkstoffe sind auch besonders temperaturwechselbeständig.

Selbstverständlich müssen die Düsen ihre ursprüngliche Aufgabe, den Sauerstoff auf die Metallschmelze zu blasen, und die dafür optimierte Gestalt (die Lavalform) bei der Neukonstruktion beibehalten. Es ist zu vermuten, dass die Anforderungen an das Material für den vorderen Teil der Lavaldüsen am besten von oxydischen Keramikfaserverbundwerkstoffen erfüllt werden.

<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik Montanauniversität A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH) Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	--

### 7.1.1 Einsatz der faserverstärkten oxydischen Verbundwerkstoffen für die Lavaldüsen

Die Nachteile der monolithischen Keramiken, insbesondere ihre Neigung zum Spröbruch und ihre geringe Temperaturwechselbeständigkeit, können durch die Einlagerung von Fasern aufgehoben werden. Die mit Fasern verstärkten keramischen Werkstoffe zeichnen sich durch ein quasi-plastisches Verhalten aus. Hervorgerufen wird dies durch die Fasern, die im Vergleich zur Matrix in der Regel eine höhere Festigkeit und oft auch einen höheren E-Modul besitzen. Dabei ist die Verstärkung nur dann wirkungsvoll, wenn die Faser annähernd senkrecht zur Biegebelastung bzw. parallel zur Zugbelastung im Material orientiert ist. Die Fasern können dann die Matrixrisse überbrücken und somit einen Spröbruch des Werkstoffes verhindern [51]. Aus diesen Gründen werden die so hergestellten Materialien als schadenstolerant bezeichnet.

Verbundkeramiken sind aber teuer. Da bei unserer Anwendung neben der Funktionssicherheit der Düsen auch die Sicherheit von Menschen und Anlagen im Vordergrund stehen, sind die zum Teil hohen Materialkosten dieser Werkstoffe vertretbar.

Als geeignete Materialien für Lavaldüsen kommen vor allen oxydischen Materialien in Frage (sowohl bei der Faser als auch bei der Matrix), da diese mit dem ausströmenden Sauerstoff nicht mehr reagieren bzw. nicht oxidieren können. Die nichtoxydischen Verbundwerkstoffe (meist basierend auf Kohlenstofffasern) sind stark oxidierend und werden daher für diesen Einsatz außer Betrachtung gelassen.

Bei Beanspruchung kommt es bei allen Verbundwerkstoffen zuerst zur Bildung von Mikrorissen in der Matrix. Dadurch werden Spannungen abgebaut, bevor das Bauteil versagt. Diese Matrixrisse entstehen, sobald die anliegende Spannung die Festigkeit der Matrix übersteigt. In der Abb. 59 [51] ist ein schematisches Spannungs-Dehnungs-Diagramm eines Faserverbundwerkstoffes dargestellt.

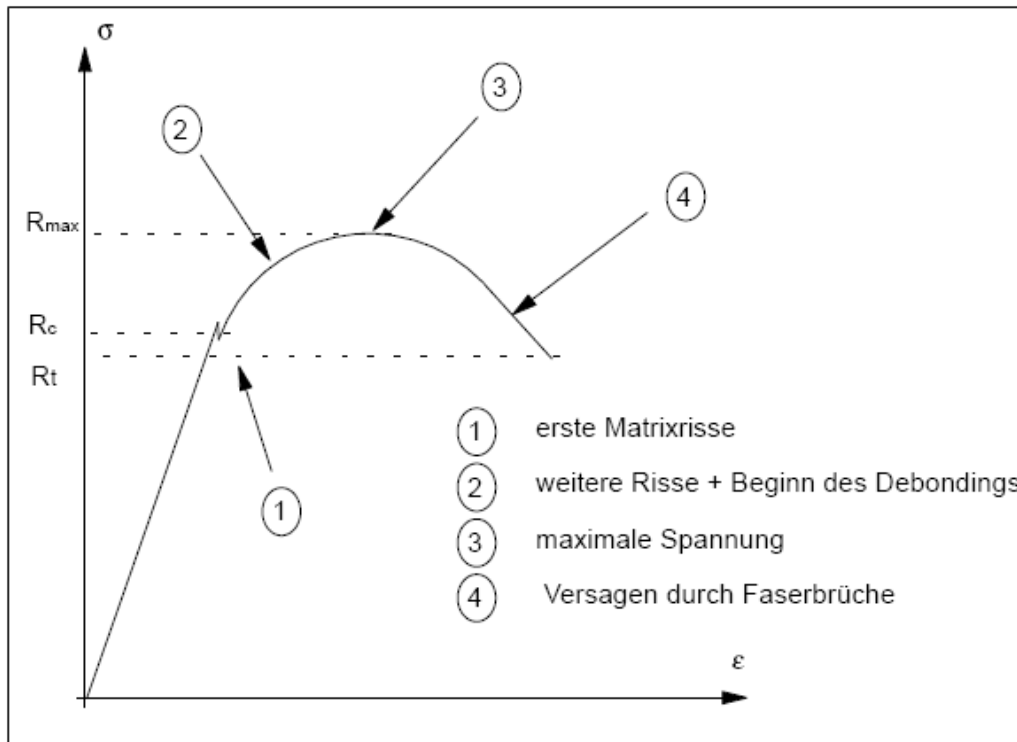



Abb. 59: Spannungs-Dehnungs-Diagramm eines Faserverbundwerkstoffs [51].

Einige kommerzielle Fasern, ihre Hersteller und ihre Eigenschaften sind in den Abb. 60 und 61 dargestellt.

Faserzusammensetzung	oxidisch	C	SiC
Faserbezeichnung / Hersteller	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nextel / 3M</li> <li>• FP / Du Pont</li> <li>• Altex / Sumitomo Chemicals</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• T300 / Toroy</li> <li>• T800 / Toroy</li> <li>• Sigrafil / Sigril</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nicalon / Nippon Carbon</li> <li>• Tyranno / UBE Industries</li> <li>• SCS / AVCO</li> </ul>

Abb. 60: Übersicht der Fasern und Hersteller.

<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik Montanauniversität A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH) Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	---


Hersteller	Oxidische Fasern				
	3M			Du Pont	Sumitomo Chemicals
Faserbezeichnung	Nextel 312	Nextel 440	Nextel 720	FP	Altex 2K
Zusammensetzung [Masse%]	62 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 24 SiO <sub>2</sub> 14 B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	70 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 28 SiO <sub>2</sub> 2 B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	85 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 15 SiO <sub>2</sub>	> 99 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	72 γ-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 28 SiO <sub>2</sub> amorph
Durchmesser [µm]	8-10	10-12	12	10-20	15-18
Filamentanzahl	—	—	420	210	2000
Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	2,7	3,1	3,4	3,9	3,25
E-Modul [GPa]	150	190	260	340-380	180-210
Festigkeit [MPa]	1700	2000-2700	2100	1600	1800-2000
Literatur	20	20-22	21-23	22, 24	21-22, 25-26

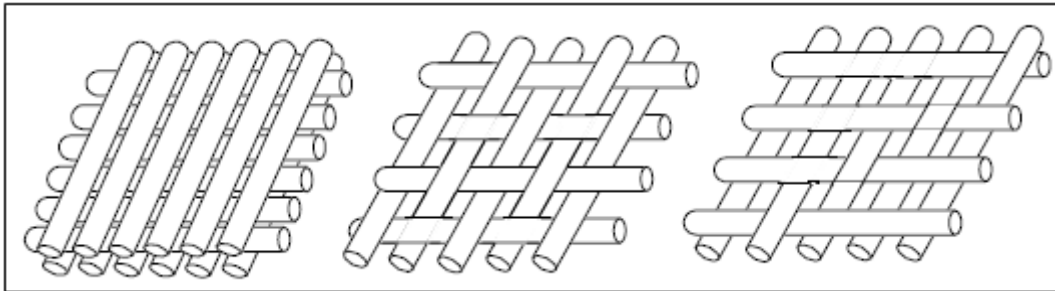
**Abb. 61:** Oxydische Fasern, ihre Eigenschaften und Hersteller [52].

Ein Nachteil der oxydischen Fasern ist ihre im Vergleich zu den nichtoxydischen Fasern geringe Festigkeit. Sie sind aber im Gegensatz zu den nichtoxydischen C-Fasern auch in sauerstoffhaltiger Umgebung bis zu Temperaturen von 1200°C einsetzbar [52]. In der Praxis haben aufgrund Ihrer Eigenschaften (Hochtemperatureinsatz) und Verfügbarkeit die Fasern der Firma 3M (Nextel 720 und Nextel 610) die meiste Verwendung gefunden. In der Nextel 720 Faser, die aus feinkristallinem  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Korund) und groben Mullit besteht, kommt es bei einer Auslagerung oberhalb 1200°C zum Kornwachstum im Korund, die Mullitkörner erst ab 1400°C vergrößern [53].

Nicht nur die Eigenschaften der Fasern sondern auch ihre Anordnung im Verbundwerkstoff können dessen mechanischen Eigenschaften, z. B. die Zugfestigkeit, stark beeinflussen. Beim Aufbau des Fasergewebes gibt es drei Grundmuster: 1-d, 2-d und mehrdimensional verstärkte Verbundwerkstoffe. Als eindimensionale Verstärkung (1-d) oder unidirektionales Gelege (UD) werden Verbundwerkstoffe bezeichnet, deren Fasern nur in eine Richtung orientiert sind. Dabei spielt es keine Rolle, ob die Fasern in Bündeln nebeneinander liegen oder ob die Filamente selbst nebeneinander liegen. Die in der Praxis gebräuchlichste Verstärkungsarchitektur ist eine zweidimensionale (2-d) Verstärkung. In der Abb. 62 sind einige Möglichkeiten dieser Anordnung dargestellt [52].



<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik Montanauniversität A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH) Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	--




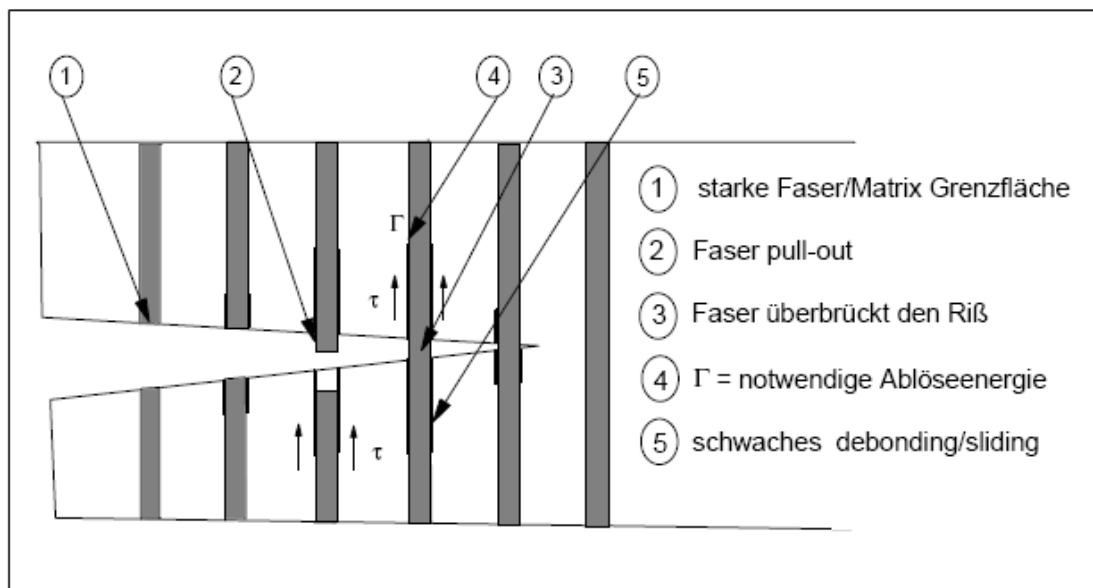
**Abb. 62:** Zweidimensionale Verstärkungsarchitekturen mit Fasern [52].

Bei der Auswahl der geeigneten Faserarchitektur wurden sowohl die Belastung (siehe Kapitel 2 und 3) als auch das geplante Einsatzgebiet (Lavaldüse) berücksichtigt. Die Fasern sollten dabei den kleinstmöglichen Durchmesser haben, da die Fasern mit großen Durchmessern nur begrenzte Krümmungsradien bei der Verarbeitung zulassen. Je größer der Faserdurchmesser ist, desto größer wird der mit Matrix zu infiltrierende Zwickelbereich zwischen den Faserbündeln. Je größer bzw. steifer die Fasern sind, desto schwieriger und ungenauer ist ihre Verformung bei der Herstellung der Teile. Insbesondere ist es nicht möglich, scharfe Ecken und Kanten aus einem Faserwerkstoff zu formen. Wenn eine scharfe Kante oder eine Ecke in einem Bauteil unbedingt nötig ist, muss diese aus der Matrix gebildet werden. Dann kann die Kante aber nicht stark beansprucht werden.

Durch ein Beschichten der Fasern können wichtige Werkstoff- und Bauteileigenschaften (Temperaturbeständigkeit, Oxidationsstabilität, Haftung der Grenzfläche zwischen Faser und Matrix) stark beeinflusst werden [54]. Für das System SiC- Faser/ SiC- Matrix wird als Faserbeschichtung vorwiegend pyrolytischer Kohlenstoff (Pyro C) oder Bornitrid (BN) verwendet [55].

Unter mechanischer Beanspruchung kann es auf Grund der schlechten Spannungsübertragung zwischen Faser und Matrix zum Herausziehen der Fasern und damit zu einem Versagen des Materials bei niedrigen Kräften kommen. Haben Faser und Matrix aufgrund der fehlenden Grenzschicht eine zu feste Bindung, so ist die Gefahr eines Sprödbruchs gegeben, d.h. der Werkstoff verhält sich fast wie eine monolithische Keramik, Abb. 66 [55].

<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik Montanauniversität A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH) Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	--




**Abb. 63:** Ausbreitung eines Risses durch einen Faserverbundwerkstoff [52].

Beschichtungen wurden in dieser Arbeit aufgrund der damit verbundenen sehr hoher Kosten nicht angewendet. Jedoch bieten sie eine Möglichkeit für weitere Verbesserungen bzw. für die Optimierung der Eigenschaften des Werkstoffes.

Bei der Lavaldüse sind keine großen mechanischen Beanspruchungen zu erwarten. Daher wurde bei der Auswahl der Werkstoffe darauf geachtet, dass der Werkstoff vor allem eine hohe thermische Stabilität und eine hohe Thermoschockbeständigkeit aufweist. Dies kann durch Verbundwerkstoffe mit einer schwachen Bindung zwischen Faser und Matrix erreicht werden.

Die auf dem Markt erhältlichen oxidkeramischen Faserverbundwerkstoffe (Oxide Ceramic Matrix Composites – OCMC) basieren zumeist auf Fasern aus Aluminiumoxid oder Mullit und Matrices im System Aluminiumoxid, Siliziumoxid und Zirkonoxid. In der Literatur werden die bereits erprobten Materialkonzepte mit Matrices mit Mullit als Hauptkomponente (Füllpulver) und Aluminiumoxid als Bindehilfsmittel empfohlen [53]. Dabei verwendet man mit Schicker infiltrierte Faserbündel oder Gewebe und nutzt die Schwindung im Sinterprozesses, um eine sehr poröse Matrix zu erzeugen [53]. Das günstige Temperaturwechselverhalten dieser Werkstoffe ist auf die schwache Faser-Matrix-Anbindung und auf das sehr poröse Gefüge der Matrix zurückzuführen. Dies bewirkt eine hohe Schadenstoleranz.

Derzeit gibt es einige Firmen und öffentlichen Institutionen die verschiedenen Oxid/Oxid-Verbundwerkstoffe entwickeln und herstellen. In der Abb. 64 sind die wichtigsten dargestellt:

<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik Montanauniversität A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH) Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	--

Material	Festigkeit	ILSS	Einsatztemperatur
COI Mullit / Nextel 610	360MPa	17MPa	<1000°C[100h]
COI Mullit / Nextel 720	195MPa	12MPa	ca.1000°C[100h]
DRL Mullit / Nextel 720	130MPa	8MPa	>1300°C[100h]
Daimler Chrysler	160MPa	18MPa	<1100°C
Pritzkow Spezialker. AvM1415N	55-65MPa	10,5MPa	35MPa (1000°C)
Pritzkow Spezialker. FW12	133MPa	17MPa	35MPa (1000°C)

**Abb. 64:** Eigenschaften von Oxid/Oxid- CMCs (Ceramic Matrix Composite) wichtiger Hersteller. (ILSS) interlaminare Scherfestigkeit.

Bei größeren Forschungs- und Entwicklungsprojekten werden in der Praxis oft neben den technischen auch unternehmenspolitische Ziele verfolgt. Zur Sicherung der zukünftigen Preispolitik, der Verfügbarkeit der benötigten Ausgangsmaterialien, der Gewährleistung von Lieferzeiten und wegen des „know how- Schutzes“ der zu produzierenden Teile werden die ausgewählten Lieferanten und ihre Produkte genauestens analysiert. Auch in diesem Projekt haben solche Motive bei der Auswahl der verwendeten Werkstoffe eine Rolle gespielt. Weiteres wurde besonders beachtet, dass die Herstellungsschritte bei der Produktion der Teile einfach und kostengünstig sind und kontinuierlich überprüft werden können. Dies ist eine wichtige Voraussetzung, um die Qualität der Teile sicherzustellen.

Es wurde entschieden, für die Düsen das FW12- Material von der Firma W. E. Pritzkow Spezialkeramik zu verwenden. Die Eigenschaften dieses Materials werden daher im Folgenden genauer dargestellt. Eine erste Übersicht gibt Abb. 65 [55].

Keramikblech Typ	AvM1415N	AvM1415N-3000	FW12	FW30	AvA-Z-ISC
Faser (Gewebe)	Nextel 610/1500 denier	Nextel 610/3000 denier	Nextel 610/1500 denier	Nextel 610/3000 denier	Nextel 610/1500 denier
Matrix	70% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / 30% SiO <sub>2</sub>	70% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / 30% SiO <sub>2</sub>	85% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / 15% 3YSZ	85% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / 15% 3YSZ	93% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / 7% 8YSZ
Biegefestigkeit [MPa]	160-170 (**)	120-130	310-320 (**)	170-200 (*)	170-180 (*)
E-Modul Biegung [GPa]	78 (**)	50	92 (**)	65 (*)	
Zugfestigkeit [MPa]	55-65 (**), (***)		133 (**)		80 (***)
E-Modul Zug [GPa]	78 (**)		93 (**)		
Druckfestigkeit [MPa]	62 (**)		207 (**)		
E-Modul Druck [GPa]	93 (**)		123 (**)		
Scherfestigkeit (ILSS) [MPa]	10,5 (**)		17 (**)	11 (*)	
Wärmedehnung [10 <sup>-6</sup> 1/K]					
25-300°C			6,94 (*)		6,80 (*)
25-600°C			7,69		7,60
25-900°C			8,17		8,09
25-1100°C			8,49		8,40
Wärmeleitfähigkeit [W/mK]					
300°C	2,44 (****)		3,80 (*)		1,34 (*)
600°C	1,89		2,81		1,02
900°C	1,63		2,30		0,87
1100°C	1,52		2,02		0,81

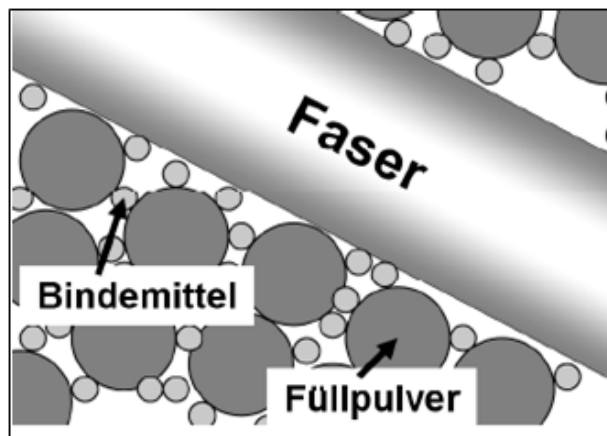
Gemessen durch FhG-ISC (\*), FhG-IWM (\*\*), Universität Bremen, Advanced Ceramics (\*\*\*) , TU Freiberg (\*\*\*\*)

**Abb. 65:** Eigenschaften des oxidkeramischen Faserverbundwerkstoffs „Keramikblech“ von W. E. Pritzkow Spezialkeramik, aus [55].



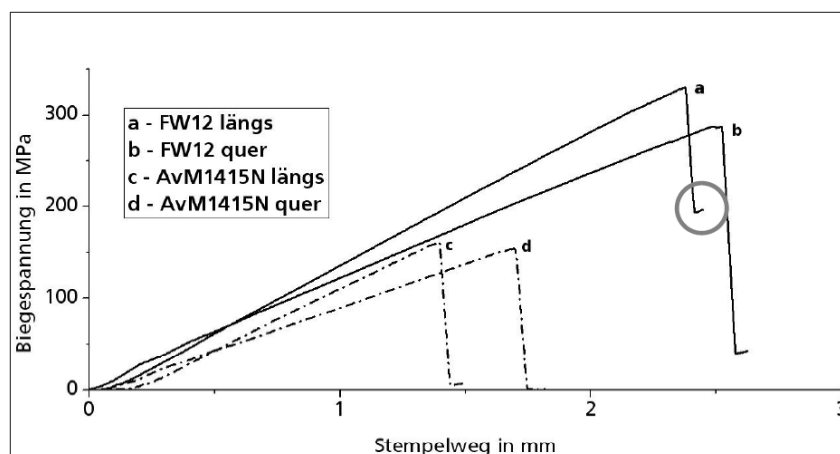
Das für die Lavaldüsen ausgewählte FW12- Material wird aus einer Matrix aus Aluminiumoxid als Hauptkomponente (Partikeldurchmesser ca.  $0.5 - 0.8 \mu\text{m}$ ) sowie aus nanoskaligen Zirkonoxid-Partikeln als Bindehilfsmittel (Partikeldurchmesser  $< 0.1 \mu\text{m}$ ) und den Fasern „Nextel 610“ hergestellt [56].

FW12 zählt zu den sog. „Weak Matrix Composites“, da die Bruchdehnung der Matrix erheblich kleiner als jene der Fasern ist. Daher wird in diesem Zusammenhang auch oft von „Inverse Composites“ gesprochen [57]. Um die Faser-Matrix-Anbindung möglichst schwach zu halten (durch einen hochporösen Matrixaufbau) wird bei der Herstellung dieses Materials eine bimodale Größenverteilung der entsprechenden Partikel (Füllpulver und Bindemittel) vorgenommen [58]. Dieses Konzept ist in der Abb. 66 dargestellt.




**Abb. 66:** Weak Matrix Composites (WMC). Die schwache Faseranbindung wird durch die bimodale Verteilung der Matrixpartikel erreicht (Füllpulver und Bindemittel) [58].

Das FW12- Material wurde vom Hersteller im Vergleich zu seinem ebenfalls praxisbewährtem Standardmaterial AvM1415N getestet. Die Ergebnisse der Vierpunkt-Biegeversuche zeigen eine Biegefestigkeit der FW12- Proben (a, b) von etwa 300 MPa (siehe Abb. 67) [59].



**Abb. 67:** Typische Spannungs-Durchbiegungs-Verläufe von Vierpunkt-Biegeproben, aus [59].

<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik Montanauniversität A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH) Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	--

Wie in der Abb. 67 zu sehen sind die Längsproben (a, c) jeweils etwas steifer als die Querproben (b, d). Die FW12-Längsprobe zeigt nach dem Matrixbruch eine Restfestigkeit von etwa 200 MPa (eingekreister Bereich in der Abb. 67). So eine Restfestigkeit konnte bei den AvM- Proben nicht beobachtet werden. Dies lässt auf eine besonders hohe Schadenstoleranz der neuen Materialvariante schließen. Das neuentwickelte FW12-Material weist bei allen untersuchten Belastungsbedingungen im Vergleich zum Standardmaterial AvM1415N eine um etwa 100 % gesteigerte Festigkeit auf [59]. Die für unseren Anwendungsfall erforderliche Schadenstoleranz bleibt gegenüber dem Referenzmaterial stets erhalten bzw. konnte sogar noch erhöht werden.


Auch das für unseren Anwendungsfall wichtige Thermoschockverhalten des FW12- Materials wurden im Rahmen der Zusammenarbeit von E.H. Pritzkow und IABG (Industrieanlagen-Betriebsgesellschaft mbH) getestet. Die Ergebnisse dieser Versuche wurden leider noch nicht veröffentlicht. Sie wurden uns jedoch vom Autor freundlicherweise zur Verfügung gestellt [59]. Der Versuchsaufbau ist in der Abb. 68 zu sehen:



**Abb. 68:** Typischer Spannungs- Einsatz von Buchsen im Zylinderkopf-Prüfstand der IABG mbH bei extremen Thermoschocks [59].

Bei diesen Versuchen wurden die Testmaterialien FW 12 (unbeschichtet) mit einer Wandstärke von 1mm und FW12- (beschichtet) mit einer Wandstärke von 1,5 mm als Testbuchsen (Abb.68 Links im Bild) hergestellt und in einer Heißgasanlage montiert (Abb.68 Rechts im Bild). Um die getesteten Materialien thermisch (Thermoschock) zu beanspruchen, wurde ein Gas mit Temperaturen von 20°C bis  $T = 1200^{\circ}\text{C}$  bzw. bis  $T_{\text{max}} = 1450^{\circ}\text{C}$  mit einer Zykluszeit von 30 sec (kalt – heiß) durch die Testbuchsen geleitet.

Nach etwa 500 Zyklen zeigten die Buchsen aus FW 12- Material ohne Thermalschutz erste optische Schäden (lokale Auflösung des Materials). Die Buchsen mit Thermalschutz (FW12- beschichtet) hatten dagegen auch nach mehr als 5000 Zyklen keine erkennbaren Schäden. Diese Ergebnisse sind für unser Vorhaben als besonders vielversprechend zu bezeichnen.

<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik Montanauniversität A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH) Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	--

Eine weitere Möglichkeit zur Verbesserung der gewünschten Eigenschaften von Verbundwerkstoffen können keramische Beschichtungen des Werkstoffes verwendet werden. Diese sollen den Werkstoff auch vor Oxidation und chemische Reaktionen mit den Umgebungsmedien schützen. Wegen der schon beschriebenen extremen Bedingungen im vorliegenden Anwendungsfall kommen hier nur Werkstoffe in Frage, die in besonderem Maße thermisch beständig und Temperaturwechselfest sind.


Die bei dem FW12- Material angewendete Beschichtung wurde dem Hersteller vom Autor dieser Arbeit empfohlen. Dabei handelt es um das bei der Herstellung des FW12- Materials schon verwendete Matrixmaterial aus Aluminiumoxid als Hauptkomponente und um nanoskalige Zirkonoxid-Partikel als Bindehilfsmittel. Der Ausdehnungskoeffizient der Schicht ist dem des Verbundwerkstoffes bzw. des Matrix gleich. Nach der Herstellung und dem Sintern der Proben wurde das Matrixmaterial als Schlicker auf die Oberflächen des Materials aufgetragen. Dabei infiltriert es auch die Poren. Anschließend wurden die Proben nochmals gesintert und die Oberflächen wurden fein geschliffen. Die Dicke der Beschichtung betrug nach dem Schleifprozess etwa 0,1- 0,2 mm. Durch die Beschichtung wurden die Fasern, welche ursprünglich aus der Oberfläche des Bauteils standen, eingebettet und völlig bedeckt. Im Falle einer Abrasion des Werkstoffes wird zuerst diese Schicht abgetragen, bevor es zu Schäden in der Matrix oder Faser kommt. Dadurch dient die Schicht als „Opferschicht“ zum Schutz der Faser und der Matrix bzw. des Verbundes insgesamt. Sie wird eine Verlängerung der Einsatzdauer der aus FW12- Material gebauten Lavaldüsen bewirken.

## 7.2 Werkstoffauswahl für die Stirnplatte

Vergleicht man die neue mit der alten Konstruktion des Lanzenkopfes, so zeigt sich, dass der Stirnbereich eine ganz neue Funktion annimmt. Bei den bestehenden Köpfen aus Kupfer ist der Stirnbereich als ein Teil des Kopfes und somit auch der Lavaldüsen anzusehen. Bei der Neukonstruktion befindet sich im Stirnbereich eine Platte, die von der Wasserkühlung und von den Lavaldüsen völlig getrennt ist. Sie hat die Aufgabe, die hinter ihr liegenden Teile (Düsen und die metallischen Teile) gegen die thermischen und chemischen Einflüsse der Umgebung zu schützen.

Wie in der Abb. 58 zu sehen, befindet sich diese Platte durch das Schutzgas auf ihrer Innenseite vollkommen- und auf ihrer Außenseite vermutlich zumindest teilweise in einer reduzierenden Atmosphäre. Sie wird ähnlichen thermischen und chemischen Umgebungseinflüssen wie die Lavaldüsen ausgesetzt. Durch ihre größere der Wärmestrahlung und dem korrosiven Angriff ausgesetzte Fläche werden sich diese Beanspruchungen bei der Platte aber wesentlich stärker auswirken. Insbesondere sind starke chemische Beanspruchungen der Außenseite der Platte zu erwarten, da auf dieser Seite direkter Kontakt



<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik Montanauniversität A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH) Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	--

mit der Umgebungsmedien (Schlacke, Stahl, Gase) stattfinden wird. Wie bereits gesagt könne diese thermischen und chemischen Angriffe von keinem Material auf Dauer ertragen werden.

Die Form dieser Platte ist durch die Form der der Metallteile in hohem Maß vorgegeben. Die Platte hat keine tragende Funktion und muss nur ihr eigenes Gewicht tragen.

Aufgrund dieser extremen Belastungen wird die „Platte“ aus Abb. 58 als Verbundsystem realisiert. Die innen liegenden, gekühlten und mit Schutzgas umspülten Teile des Verbundes werden aus wärmebeständigem Stahl gefertigt (Befestigungsplatte). Darüber befindet sich eine Schicht aus einer Faserverbundkeramik (Isolationsplatte), welche die Metallplatte vor allem gegen die hohen Temperaturen der Umgebung schützen soll. Die wichtigste Eigenschaft dieser Schicht ist daher eine geringe Wärmeleitfähigkeit. Zum Schutz dieser Schicht gegen den chemischen Angriff wird eine weitere Platte verwendet (Schutzplatte), die als Verschleißteil ausgeführt ist, und leicht ausgewechselt werden kann. Im Lichtbogenofen hat sich Graphit unter ähnlichen Bedingungen bewährt. Graphit ist auch sehr einfach zu bearbeiten und auch sehr kostengünstig. Daher wird Graphit als Material für dieses Verschleißteil (Platte) vorgesehen.

Die konstruktive Ausführung sowie die genau Auswahl der Werkstoffe für die Lavaldüse und das eben beschriebenen Verbundsystem für die „Stirnplatte“ wird in der Folge genauer beschrieben.

### **7.2.1 Feuerfestkeramiken als Werkstoffe für die Stirnplatte**

Im Rahmen dieser Arbeit wurden auch Feuerfestkeramiken als potentielle Kandidaten für die oben beschriebenen Bauteile in Betracht gezogen. In Abb. 69 sind einige wichtige Eigenschaften diese Materialien angegeben.

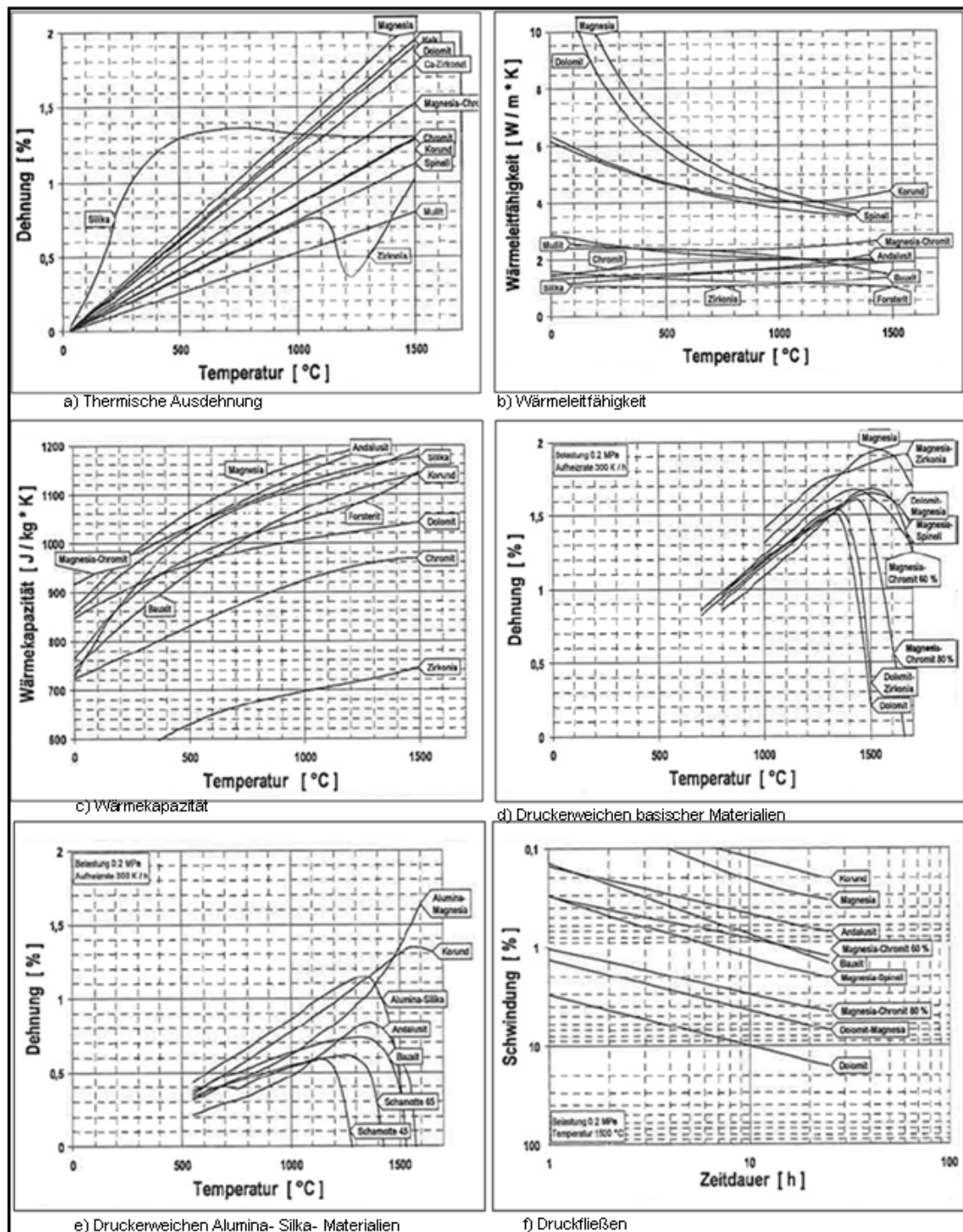



Abb. 69: Wichtige Eigenschaften von Feuerfestmaterialien in Abhängigkeit von der Temperatur, aus[60].

Die thermische Dehnung der einzelnen feuerfesten Produkte ist in der Abb. 69.a gezeigt. Außer Silika und Zirkonia weisen dabei alle Materialien eine lineare Abhängigkeit des Ausdehnungskoeffizienten von der Temperatur auf [60]. Weiteres ist ihr Einsatz, aufgrund

<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik Montanauniversität A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH) Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	---

ihrer relativ großen Wärmedehnung bezüglich der Fertigung von z.B. Endkonturen der Produkte sowie ihrer Anpassungen an die Umgebung als relativ schwierig zu beurteilen.

Die Wärmeleitfähigkeit dieser Werkstoffe ist aufgrund ihrer verschiedenen Zusammensetzungen und Art der Herstellung (offene Porosität) sehr schwer vergleichbar (Abb. 69.b). Allgemein haben die basischen und neutralen Materialien eine hohe Wärmeleitfähigkeit, die mit steigender Temperatur abnimmt. Die Silika- und Tonerdematerialien haben dagegen eine geringe Wärmeleitfähigkeit, die mit steigender Temperatur zunimmt [60]. Bei beiden Materialgruppen liegt die Wärmeleitfähigkeit im Bereich von 2- bis über 10 W/mK. Daher sind sie keine guten Isolierwerkstoffe.

Auch die Wärmekapazitäten dieser Werkstoffe sind von der Zusammensetzung der Rohstoffe abhängig (siehe Abb. 69.c) [60].


Die Feuerfestigkeit (Druckweichen) wurde zur besseren Übersichtlichkeit mit den basischen Steinsorten und mit den Schamotte- und Alumina- Steinsorten gegenübergestellt, siehe Abb. 69.d und e. Zu beobachten ist, dass die Ausdehnung dieser Werkstoffe der thermischen Dehnung folgt. Die Schwindung wird dann zum Punkt  $T_0$  (Umkehrpunkt) im Wesentlichen vom Schmelzpunkt und dem Gehalt an Schmelzphasen beeinflusst [60]. Die degressive Dehnung der Magnesia- Zirkonia- Steine ist ab 1200°C durch Phasenumwandlung des ZrO<sub>2</sub>-Anteiles zu beobachten.

Das Dauerstandverhalten (Druckfließen) wird in Abb. 69.f dargestellt. Ausgenommen der Bauxits- und Andalusit- Steine weisen alle anderen Steinsorten einen ähnlichen Exponenten auf. Nach circa 10 Stunden Testdauer und bei Temperaturen von 1500°C zeigen die Steine eine Schwindung von etwa 0,2 – 10 % [60].

In der Praxis ist beim LD- Verfahren ein thermochemisches Gleichgewicht des flüssigen Stahls, der Schlacke, des Feuerfestmaterials und der Atmosphäre nur schwer konstant zu halten. Um den Stoffumsatz zu erhöhen, wird der Abstand zum Gleichgewicht während des gesamten Prozesses sogar bewusst groß gehalten. Dies führt zur chemischen Reaktionen und anschließend zu dem Verschleiß der feuerfesten Zustellungen. Sie lösen sich auf und reagieren chemisch, bilden Einschlüsse im Stahl oder entweichen gasförmig [61].

Erwünscht sind in dieser Umgebung bzw. für unseren Anwendungsfall inerte Feuerfestmaterialien. Diese gibt es aber leider nicht.

Zusammenfassend kann man feststellen, dass die Feuerfestprodukte, die im LD- Prozess als Zustellung eingesetzt werden, aufgrund ihrer Eigenschaften als Material für die Isolations- und Schutzplatte auszuschließen sind.

<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik Montanauniversität A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH) Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	---


### 7.2.2 Faserverstärkte oxydische Verbundwerkstoffe als Werkstoffe für die Stirnplatte

Die faserverstärkten oxydischen Verbundwerkstoffe kommen vor allem für die Isolationsplatte in Frage. Diese soll die darunterliegenden metallischen Teile vor den hohen Temperaturen schützen. Obwohl für diese metallischen Teile hochtemperaturbeständige Stähle eingesetzt werden, sollten diese während ihres Einsatzes nicht für längere Zeit über 300°C erwärmt werden, da sie ihre Festigkeit während des Einsatzes bewahren müssen. Zwischen und an den metallischen Teilen werden zur Prozessüberwachung verschiedene Messinstrumente installiert. Auch die Messgeräte funktionieren bei höheren Temperaturen nicht bzw. können diesen nicht lange standhalten.

Der hier für die Isolationsplatte auszuwählende Werkstoff muss also eine sehr geringe Wärmeleitfähigkeit aufweisen. Gleichzeitig soll er eine hinreichende Temperaturwechselbeständigkeit besitzen. Der für die Lavaldüsen ausgewählte und neuentwickelte Oxidkeramische Faserverbundwerkstoff FW12 hätte für diese Anwendung eine hinreichende Temperaturwechselbeständigkeit. Seine relativ gute Wärmeleitfähigkeit, die bei Raumtemperatur etwa 2,0 [W/mK] beträgt, und seine Temperaturbeständigkeit bis 1300°C sind für diese Anwendung aber ungenügend. Bedenkt man, dass die Isolationsplatte als ein Verschleiß- und Austauschteil vorgesehen ist, so sind auch die hohen Kosten von FW12 für diese bzw. eine Langzeitanwendung nicht akzeptabel. Für die Isolationsplatte wird vor allem auf die thermische und weniger auf die chemische Resistenz des Werkstoffes Wert gelegt. Eine hohe Isolationswirkung weisen Faserwerkstoffe aus polykristalliner Aluminiumoxidfaser sowie speziellen anorganischen Fasern und Bindern auf [62]. Als fertige Erzeugnisse werden sie als lose Wolle (Bulk), Fasermatten, Filze, Papier, Gewebe, Schnüre oder Vakuumgeformte Platten von verschiedenen Herstellern wie Calderys, RATH, KAGER, ALFATEC angeboten. Insbesondere sind die Keramikfaserplatten als festes faseriges Isolationsmaterial für hohe Temperaturen bzw. als ein Isolationsmaterial sehr gut geeignet. Sie besitzen eine relativ hohe Biegefestigkeit im Einsatz bei hohen Temperaturen. Sie sind leicht und können hohe Temperaturwechsel ertragen [63]. Sie werden bereits als Isolationsmaterial der Teile eingesetzt, die rasch erhitzt oder abkühlt werden. Beispiele sind die Auskleidung bei metallurgischen LF Öfen (Ladle Furnace, Ofendeckel).

Die meisten Produkte werden aus der polykristallinen Wolle, die aus Fasern mit einem Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Gehalt > 70 Gew. % bestehen, und SiO<sub>2</sub>- Fasern aus wässrigen Spinnlösungen erzeugt. Auch die Vakuumgeformte Produkte werden mit Mineralwolle, sowie mit keramischer Hochtemperaturwolle auf Basis von Magnesiumsilikat, Aluminiumsilikat und Aluminiumoxyd hergestellt [62]. Je nach Rohstoff können diese Formteile bis 1800°C Anwendungstemperatur eingesetzt werden.

Die Herstellung dieser Teile ist relativ einfach. Dabei werden die Wolle, Füllstoffe und Bindemittel in einem Tank vorgemischt und anschließend in einen Formtank eingebracht. Die Form, welche das Negativ des späteren Produktes darstellt, ist mit einem Sieb bespannt und

<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik Montanauniversität A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH) Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	--

an eine Vakuumpumpe angeschlossen. Beim Durchsaugen der Suspension durch die Form bildet sich ein Filterkuchen, der als Rohprodukt bezeichnet wird. Dieses Rohprodukt wird anschließend getrocknet, gebrannt und danach mechanisch bearbeitet. Das Gefüge dieses Werkstoffes besteht aus vielen Fasern, zwischen denen Hohlräume bestehen. Wegen ihres geringen Gewichtes speichert die Wolle nur sehr wenig Wärme. Bedingt durch die Fasern haben diese Werkstoffe eine hervorragende Temperaturwechselbeständigkeit [64].

Diese Produkte werden bei fast allen Hersteller nach Klassifikations- bzw. Anwendungstemperatur typisiert. Die Produkte, welche die höchsten Anteile (bis 90 %) an  $\text{Al}_2\text{O}_3$  Fasern aufweisen, sind besonders temperaturbeständig.


Aufgrund der bereits etablierten Massenfertigung dieser Produkte sind diese relativ billig. Eine  $1\text{m}^2$  große Vakuumformplatte kostet derzeit etwa € 100.

Für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche, wurden die Produkte der Firma ALFATEC GmbH verwendet. In der Abb. 70 sind die wichtigsten Eigenschaften dieser Produkte dargestellt.

Qualität	1700/400	1750/300	1750/500	Quality
<b>Klassifikations-temperatur</b>	1700°C	1750°C	1750°C	<b>Max. use temperature</b>
<b>Daueranwendungs-temperatur</b>	1700°C	1750°C	1750°C	<b>Continuous temperature</b>
<b>Mindest-Rohdichte [kg/m<sup>3</sup>]</b>	350-450	300-400	450-550	<b>Minimum bulk density [kg/m<sup>3</sup>]</b>
<b>Lineare Schwindung [ % ]</b>				<b>Linear shrinkage [ % ]</b>
1600°C	-0,1%	-0,2%	0,0%	at 1600°C
1700°C	0,2%	-0,1%	0,4%	at 1700°C
1750°C	--	0,5%	2,0%	at 1750°C
<b>Chemische Richtanalyse [ % ]</b>				<b>Typical chemical Analysis [ % ]</b>
$\text{Al}_2\text{O}_3$	80%	80%	80%	$\text{Al}_2\text{O}_3$
$\text{SiO}_2$	20%	20 %	20%	$\text{SiO}_2$
<b>Wärmeleitfähigkeit [W/mK]</b>				<b>Thermal conductivity [W/mK]</b>
800°C	0,21	0,20	0,22	at 1200 °C
1000°C	0,23	0,22	0,24	at 1400 °C
1200°C	0,26	0,25	0,28	
1400°C	0,31	0,30	0,33	
<b>Spezifische Wärme [kJ/kgK]</b>	1,04	1,04	1,04	<b>Specific Heat [kJ/kgK]</b>
<b>Durchschlagsfestigkeit [V/mm]</b>	3000	3000	3000	<b>Dielectric strength [V/mm]</b>

Abb. 70: Eigenschaften der Vakuumformprodukte der Firma ALFATEC GmbH, aus [65].



<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik Montanauniversität A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH) Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	--

Bei der Verwendung dieser Werkstoffe muss darauf geachtet werden, dass sie bei Temperaturen  $> 1300^{\circ}\text{C}$  zur Schwindung neigen. Diese ist auf die Nutzung der reaktiven Vorstufen des Mullit für die Matrixherstellung zurückzuführen. Reaktionen zwischen  $\text{SiO}_2$  aus dem Binder und  $\text{Al}_2\text{O}_3$  aus der Faser führen bei hohen Temperaturen zu einer Abnahme der spezifischen freien Oberfläche der Partikel (Diffusionsvorgänge, Bildung von Schmelzen, Phasenumwandlungen) und damit zu einer Verdichtung des Gefüges, was letztlich eine Volumenminderung des Verbundwerkstoffs bewirkt [66].

Das Kriechen und Kornwachstum bei hohen Temperaturen kann zur Reduzierung der Temperaturwechselbeständigkeit des Werkstoffes führen. Weiteres führt dies zu einer Abnahme der mechanischen Eigenschaften des Teiles, was letztlich zum Versagen führen kann.


Trotz dieser Einschränkungen erscheinen diese Werkstoffe als Material für die Isolationsplatte als geeignet.

### 7.2.3 Werkstoffe auf Kohlenstoffbasis für die Schutzplatte

Die Schutzplatte soll die anderen Teile des Lanzenkopfes gegen die chemische Beanspruchung durch Schlacke, Metall, Gase sowie Dämpfe im Konverter schützen. Sie soll mit den Umgebungsmedien nicht chemisch reagieren bzw. dadurch nicht chemisch verschleifen. Wie früher festgestellt, gibt es leider keine Werkstoffe, die auf Dauer in dieser rauen Umgebung eingesetzt werden. Daher wurde in Rahmen dieser Arbeit nach Alternativen gesucht, die auch bezüglich der chemischen Bedingungen einen längeren Einsatz als Schutzplatte ermöglichen. Der Einsatz der Werkstoffe auf Basis von Kohlenstoff wurde dabei genauer untersucht.

Beim Lichtbogenofenprozess häufig als EAF Prozess (Electric Arc Furnace) genannt wird elektrische und chemische Energie zum Aufschmelzen des Einsatzgutes eingesetzt. Dabei wird ein großer Teil der Gesamtenergie in thermische Energie (bis  $3500^{\circ}\text{C}$ ) umgesetzt. Die Wärme über dem Lichtbogen, der zwischen den Elektroden und dem Einsatzgut brennt, wird hauptsächlich durch Strahlung auf das Einsatzgut übertragen. Als Werkstoff für diese Elektroden wird in der Praxis der Elektrodenkohlenstoff (Carbon) verwendet. Wie in der Abb. 71 zu sehen ist dieser während des EAF Prozesses (ähnlich wie beim LD Prozess) verschiedenen Einflüssen aus der Umgebung ausgesetzt. Neben der sehr hohen Temperaturen ( $>1700^{\circ}\text{C}$ ) sind die Elektroden aus Carbon auch dem direkten Kontakt mit der Stahlschmelze und Schlacke in einer oxydativen Umgebung ausgesetzt. Während des Einsatzes im Lichtbogenofen zeigen die Elektroden keine Benetzung mit Stahlschmelze oder Schlacke. Im Durchschnitt wird ihr Verbrauch (Verschleiß) auf circa 1 cm / pro t des hergestellten Stahles abgeschätzt. Der Verschleiß der Elektroden aus Carbon basiert auf den Wechselreaktionen



<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik Montanauniversität A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH) Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	--

mit dem Sauerstoff und der Schlacke. Dieser ist also stark von ihrer Konzentration ( $O_2$ ) und Intensität abhängig.




**Abb. 71:** Graphitelektroden beim EAF Prozess.

Aufgrund seiner Robustheit und der Möglichkeit einer relativ kostengünstigen Herstellung bietet sich Elektrodenkohlenstoff als Werkstoff für die Schutzplatte an.

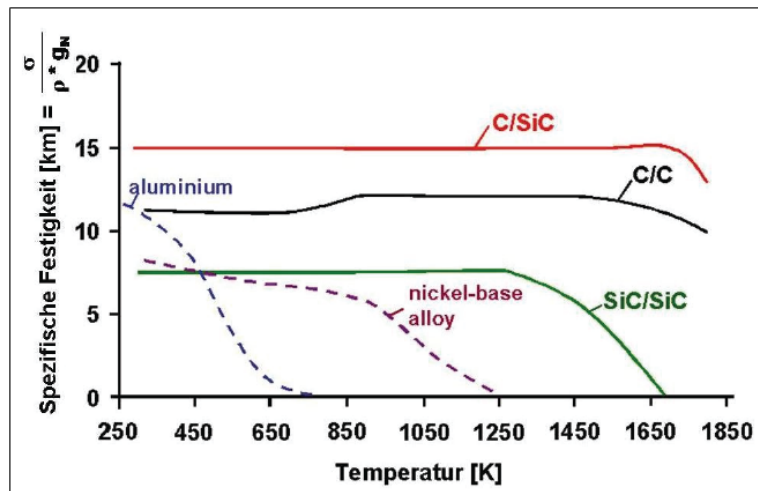
Als weitere Werkstoffe auf Kohlenstoffbasis erscheinen auch die kohlenstofffaserverstärkten Kohlenstoffe (kurz CFC oder C/C) für unsere Anwendung als möglich. Diese Werkstoffe werden in der Industrie als Auskleidungen bei hohen Temperaturen sowie zum Kantenschutz von Isolationsmaterialien angewendet. Die C/C- Verbundwerkstoffe zeichnen sich durch eine hohe Temperaturwechselbeständigkeit, sehr kleine - lineare thermische Ausdehnungskoeffizienten, hohe Festigkeiten (bis 280 MPa) und hohe Steifigkeiten bei hohen Temperaturen insbesondere bei Verwendung unter Vakuum oder Inertgasatmosphären (z.B.: Stickstoff oder Argon) aus [66].

Wie alle Verbundwerkstoffe kombinieren CFC- Materialien die typischen Eigenschaften ihrer Werkstoffkomponenten (Matrixwerkstoff und Faserwerkstoff). Die Kohlenstofffasern weisen bei Temperaturen bis 400°C sowie bei höheren Temperaturen in Inertatmosphäre deutlich bessere mechanische Eigenschaften als die keramischen Fasern auf [66].

In der Literatur wurden zum Oxidationsschutz der Kohlenstofffasern einige Möglichkeiten (z.B. verschiedene Beschichtungen der Faser) beschrieben. Jedoch ist die Anwendung dieser Techniken noch nicht für eine Serienproduktion ausgereift. Weiteres werden auch oft Probleme solcher Schutzsysteme (z.B. aufgrund unterschiedlicher Ausdehnungskoeffizienten) beschrieben, die zum Versagen dieser Werkstoffe führen [66, 67]. Weiteres sind diese Schutzsysteme sehr teuer und damit nicht für unseren Anwendungsfall geeignet. Vielmehr wird die hervorragende Hochtemperaturbeständigkeit des C/C- Werkstoffs in einem oxidationsgeschützten Zustand oder unter einer Inertatmosphäre genutzt. Die

<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik Montanauniversität A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH) Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	--


Hochtemperaturbeständigkeit des C/C- Werkstoffs unter einer Inertatmosphäre ist in Abb. 72 dargestellt:



**Abb. 72:** Hochtemperaturbeständigkeit des C/C- Werkstoffs in einem oxidationsgeschützten Zustand oder unter einer Inertgasatmosphäre im Vergleich mit anderen Hochtemperaturwerkstoffen aus [68].

Wie in [68] beschrieben zeigen die aus Kohlenstoff gefertigten Produkte eine sehr niedrige Benetzbarkeit durch die meisten metallischen Schmelzen. Daraus resultiert ein geringer Kontakt der Kohlenstoffplatte mit metallischen Spritzern, was als günstig zu bewerten ist.

Für die Schutzplatte sollten mehrere der hier beschriebenen Werkstoffe auf Kohlenstoffbasis getestet werden. Dabei sollten aus diesen Werkstoffen Schutzplatten gefertigt und an der Isolationsplatte befestigt werden. Mögliche Materialien wären das Elektrodenmaterial (Karbonelektrode) für den EAF- Prozess und das Produkt SIGRABOND® (Karbonfaserverstärkter Kohlenstoff) der Firma SGL. In der Industrie wird z.B. SIGRABOND® für Bauteile sowie mechanische Verbindungselemente bei Hochtemperaturanwendungen bis zu 2.000 °C erfolgreich eingesetzt. Die typischen Eigenschaften sind in Abb.73 zusammengestellt.

Materialtype Eigenschaften*		Standard	Premium	
Rohdichte	g/cm <sup>3</sup>	1,45	1,50	
Biegefestigkeit, ⊥	MPa	140 – 180	240 – 300	
Biege-E-Modul, II	GPa	60 – 70	70 – 85	
Zugfestigkeit, II	MPa	300 – 350	320 – 400	

**Abb. 73:** Wichtige Eigenschaftswerte des Verbundwerkstoffes SIGRABOND, aus [69].

Um den Verschleiß durch Oxydation zu minimieren sollte die Schutzplatte möglichst gut durch Schutzgas aus ummanteln werden. Dazu könnten ebenfalls Ringspalte vorgesehen werden.



## 8. Die neue Konstruktion des Sauerstoffblaselanzenkopfes

Die im Rahmen dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse über die Eigenschaften der einzelnen Werkstoffe sowie ihre möglichen Anbindungen an die metallischen Teile und ihrer Funktionalität in der Gesamtkonstruktion haben gezeigt, dass ein einzelner Werkstoff die nötigen Aufgaben nicht erfüllen kann. Im neuen Sauerstoffblaselanzenkopf werden daher verschiedene Werkstoffe eingesetzt. Besonderes wurde dabei darauf geachtet, dass die Eigenschaften, die für unseren Anwendungsfall benötigt werden und vom Werkstoff unterstützt werden, möglichst optimal zum Einsatz kommen. Der Werkstoff FW 12 wurde wegen seiner guten Oxidations- und Temperaturwechselbeständigkeit für die Lavaldüsen ausgewählt. Die gute thermische Isolationsfähigkeit der Vakuumformprodukte (AV 1800) der Firma ALFATEC wird bei der Isolationsplatte genutzt. Für die Schutzplatte wird wegen der hohen chemischen Beständigkeit ein Werkstoff auf Kohlenstoffbasis vorgesehen. Bestimmte Verbindungen und Teile im „kalten“ Bereich (Teile der Lavaldüsen und die Befestigungsplatte) wurden auch weiterhin metallisch ausgeführt. In der Abb. 74 ist der neu entwickelte Sauerstoffblaselanzenkopf dargestellt:

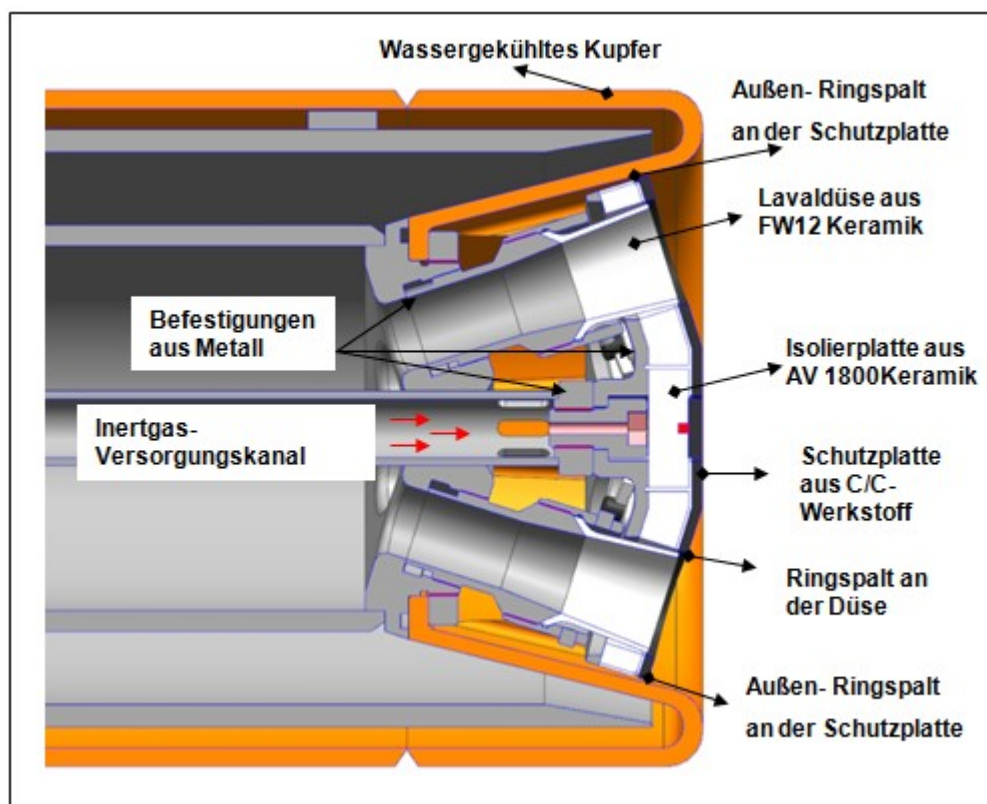



Abb. 74: Aufbau des neuen Lanzenkopfes.

<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik Montanauniversität A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH) Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	--

Die neue Konstruktion wurde bereits in mehreren Publikationen des Autors beschrieben [38, 70, 71]: Die äußere Form der metallischen und wassergekühlten Sauerstofflanze ist unverändert geblieben. Als zusätzlichen Schutz vor der Verbärung der Lanze wird ein wassergekühltes Kupferrohr auf 2 m Länge (gemessen vom Lanzenkopf aufwärts) anstatt des Stahlrohrs eingesetzt. Durch den Einsatz von Kupfer und durch das einfachere Wasserkreislaufsystem (der Innenbereich des Kopfes wird nicht mehr wassergekühlt) wird nun der Außenbereich noch intensiver als bei der herkömmlichen Konstruktion (Rohr aus Stahl) gekühlt. Dies sollte die Verbärung der Lanze deutlich reduzieren. Zum einen benetzen die meisten metallischen Schmelzen das Kupfer schlechter als Stahl, zum anderen sollten die kleinen Partikel der Schlacke und des Metalls, wenn sie in Kontakt mit der Oberfläche des gekühlten Kupfers kommen, stark abgekühlt werden und dadurch nicht mehr mit dem Kupfer reagieren können. Obwohl die anderen inneren Teile des Lanzenkopfes nicht direkt wassergekühlt werden, sind sie vom Kupferrohr umhüllt und dadurch vor der Umgebung geschützt. Die Verlängerung des Kupferrohres ist zwar teuer, dies erscheint durch die einfache Form, die erwartete lange Einsatzdauer und die wichtige Funktion als Schutz gegen die Verbärungen der Lanze aber gerechtfertigt zu sein.

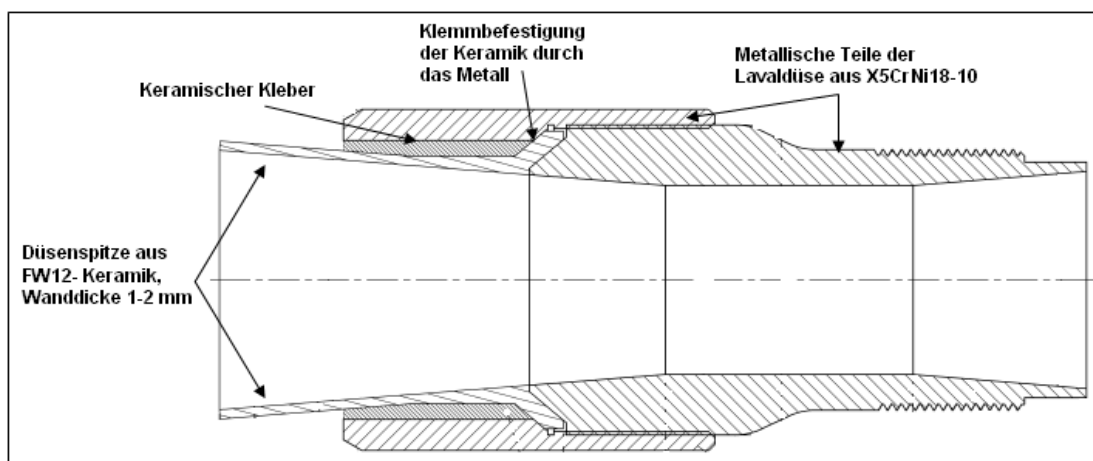
Durch die Trennung der Lavaldüsen voneinander und durch ihre Trennung von der Wasserkühlung wurde im inneren Bereich des Lanzenkopfes ein Freiraum geschaffen, in dem das Schutzgas durch einen Versorgungschanal eingeleitet wird. Der Versorgungschanal wird in der Mitte des Rohres für die Sauerstoffzufuhr montiert. Das Inertgas staut sich im Raum hinter den Schutzplatten und wird dann durch die Ringspaltöffnungen der Düsen und der Schutzplatte nach außen gepresst. Gasdruck, Mengen und Geschwindigkeiten von etwa 10-60 m/s wurden bereits in Kapitel 5. beschrieben. Eine Möglichkeit zur einfachen Regulation des Gasstromes ist ebenfalls vorgesehen.

Weitere Teile, die sich in diesem mit Schutzgas gefüllten Bereich des Kopfes befinden, sind vor allem die metallischen Verbindungen der Lavaldüsen und der Isolationsplatte mit der Lanze. Zur einfacheren und robusteren Handhabung bei der Montage und Demontage werden sie aus dem temperaturbeständigen Stahl (X5CrNi18-10) gefertigt. Durch ihre hohe Wärmeleitfähigkeit, die Kühlwirkung des Schutzgases und den direkten Kontakt mit den ebenfalls gut gekühlten Kupferteilen des Lanzenkopfes sollten die metallischen Teile (hintere Teile der Düse, Befestigungsplatte) auch im Falle eines Ablösens der keramischen Isolations-teile den Schutz des Gesamtsystems für einige Zeit gewährleisten. Auf diesen metallischen Teilen werden nun die Teile aus Keramik befestigt, wobei versucht wurde, die oben erwähnten Regeln für keramikgerechtes Konstruieren zu beachten. Darauf wird in der Folge genauer eingegangen.



## 8.1 Lavaldüsen


Bei den neuen Lavaldüsen wurde aus prozesstechnischen Gründen besonderes darauf geachtet, dass ihre Innenkonturen unverändert bleiben. Dies bezieht sich auf ihren Einlauf, den engsten Querschnitt und den Auslauf. Die Oberflächen der Innenwände der Düse sollen dabei möglichst glatt sein, um das laminare Strömen des Sauerstoffs keinesfalls zu hindern. Die neue Lavaldüse besteht aus einem Hinterteil aus Stahl (X5CrNi18-10) und aus einem Vorderteil aus oxydischer Faserverbundkeramik (FW12). Das metallische Teil dient zur Verbindung der Düse mit der Sauerstoffzufuhr der Lanze. Es ermöglicht auch ein leichtes und schnelles Auswechseln der Düsen. Weiteres stützt der metallische Teil die Düsen Spitze aus Keramik, die auf das Metallteil geschoben und mit ihm verklemmt und verklebt ist. Durch die hohe Wärmeleitfähigkeit des Metalls wird die von der Keramik aufgenommene Wärme weitergeleitet, was die Temperatur in der Keramik senkt und für die Lebensdauer der Keramik günstig ist. Der Aufbau der neuen Lavaldüse ist in Abb. 75 dargestellt:



**Abb. 75:** Die neue Lavaldüse besteht aus einem Vorderteil aus einem oxydischen Faserverbundwerkstoff (FW12) und einem Hinterteil aus Stahl, der in das Rohr für die Sauerstoffversorgung geschraubt wird.

Die keramikgerechte Verbindung der Keramik- und Metallteile ist für das sichere Arbeiten der Düse von großer Bedeutung (siehe auch Kapitel 6). Wie in der Abb. 75 zu sehen ist, wurden hier eine Kombination von Klemmen und Kleben verwendet. Die keramische Düsen Spitze wird zwischen zwei metallische Teile gepresst und dadurch unter Druck gesetzt. Im wesentlich sind die Kräfte, die durch das Pressen auf die Keramik aufgebracht werden, entgegengesetzt zu den Kräften die von der Strömung des Sauerstoffs verursacht werden. Damit wird die Keramik in weiten Bereichen mit Druck beansprucht. Um die Klemmkkräfte gut zu verteilen wird zwischen dem Keramik- und dem Stahlrohr ein keramischer Kleber aufgebracht. Dieser hat die gleiche Zusammensetzung, wie die Matrix der FW 12 Keramik

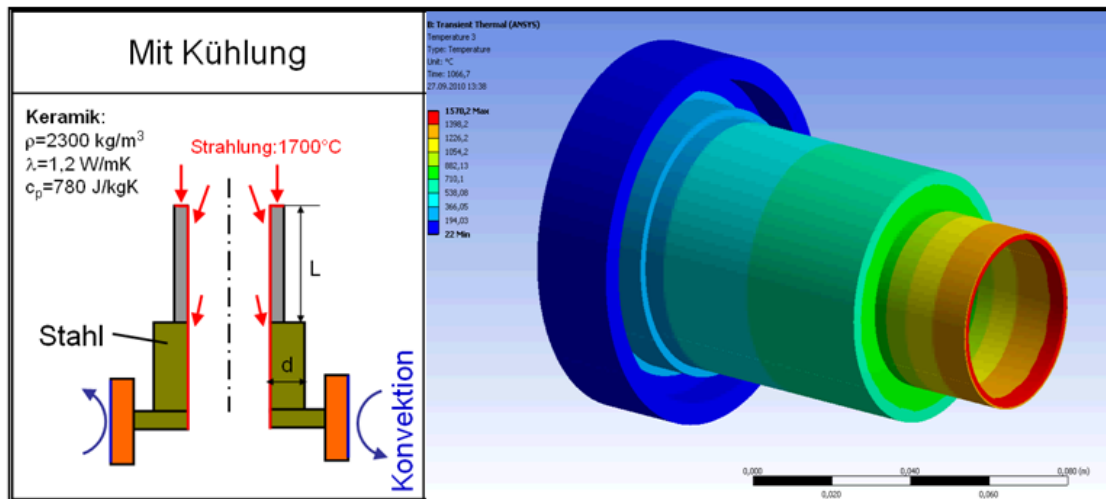


<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik</b> <b>Montanauniversität</b> <b>A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH)</b> <b>Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	--

und weist deswegen auch den gleichen Ausdehnungskoeffizienten auf. Dies sollte günstig für die Temperaturwechselbeständigkeit der Verbindung sein.

Bei der Düsenspitze aus FW12- Keramik wurde darauf geachtet, sie möglichst dünnwandig auszuführen (1 – 2 mm), um die der Wärmestrahlung ausgesetzte Fläche (und damit die Temperaturen in der Düsenspitze) möglichst gering zu halten. Die geringe Wandstärke der Düsenspitze ermöglicht auch eine bessere (relative) Kühlung durch den Sauerstoff und das Schutzgas. Die Düsenspitze ist durch den Sauerstoff einem Druck von circa 1- 1,2 bar ausgesetzt. Aufgrund der hohen Druckfestigkeit von FW12 sollte auch die Düse trotz der relativ geringen Wanddicke (1- 2 mm) dieser Beanspruchung standhalten. Zuletzt bewirkt die geringe Wandstärke der Düse auch einen geringen Materialeinsatz, was sich günstig auf die Kosten der Düse auswirkt.


Im Rahmen dieser Arbeit wurden am ISFK der MU Leoben FEM- Analysen der Düsen durchgeführt [72]. Dabei wurden unter anderem die Temperaturentwicklung in der Düse (Keramik und Metall) und ihrer Befestigung während des Prozesses (Prozessdauer 20min) und ihre eventuellen Auswirkungen auf die Konstruktion der Lavaldüse analysiert. In der Abb. 76 sind das Prinzipmodell und wichtige Ergebnisse dieser Berechnungen für die Düse dargestellt.



**Abb. 76:** Prinzipmodell und Ergebnisse der FEM- Analysen für die Düse, nach [72]. Bei einer Umgebungstemperatur von 1700 °C erreicht die Düsenspitze 1570 °C.

Die Arbeiten zeigen, dass die Temperaturentwicklung (insbesondere an der Düsenkante) stark von der Strahlungsintensität der Umgebung abhängt. Wegen der geringen Wärmekapazität und des kleinen Wärmeübergangskoeffizienten des zur Kühlung verwendeten Sauerstoffes und Schutzgases kann die an der Düsenspitze auftreffende Strahlungswärme nur langsam in die hinteren Bereiche der Keramikdüse geleitet werden, wo die Wärme über die Metallteile abgeführt wird. Um diese Kühlung durch die Metallteile möglichst effizient zu gestalten

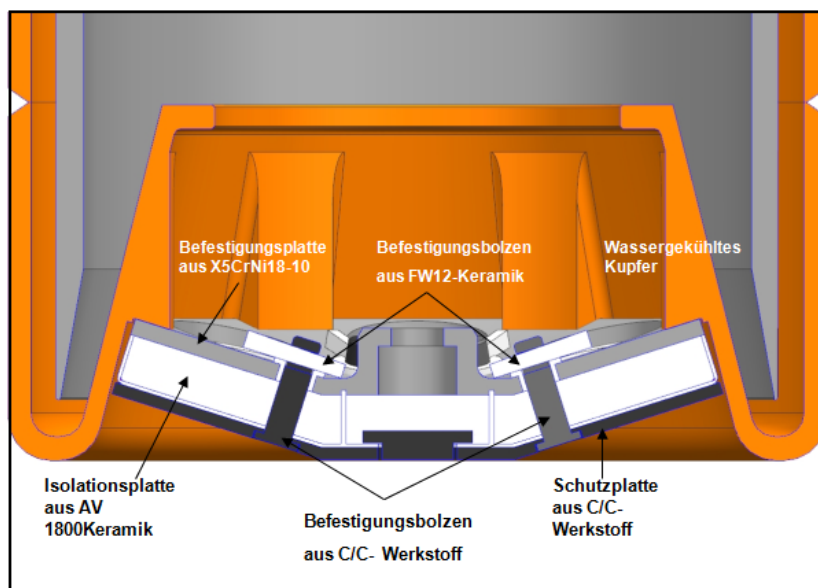


<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik Montanauniversität A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH) Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	--

sollten diese möglichst massiv ausgeführt werden, d.h. sie sollten eine möglichst große Wanddicke aufweisen. In dem in der Abb. 78 dargestellten Beispiel ist die Temperatur an der Düsen Spitze mit 1570°C um 130 °C geringer als die Strahlungstemperatur der Umgebung (1700°C). Auch eine zusätzliche Beschichtung der Außenwände der Düsen Spitze, z.B. durch Kupfer oder TiO<sub>2</sub> würde zu keiner wesentlichen Minderungen der Temperaturen in der Düsen Spitze führen, da diese wegen ihrer geringen Wandstärke sehr schnell die Umgebungstemperatur annimmt.

## 8.2 Schutzsystem des Lanzenkopfes


Bei der Konstruktion des Schutzsystems „Stirnplatte“ wurde besonderes auf die Wandstärke der Platten, auf einfache Herstellbarkeit und auf die Verbindung der Platten mit den anderen Teilen des Lanzenkopfes geachtet. In der Abb. 77 ist die Anordnung der Isolierungs- und Schutzplatten im Lanzenkopf dargestellt.



**Abb. 77:** Anordnung der Befestigungs-, Isolations- und Schutzplatte im Lanzenkopf.

Wie in der Abb. 77 zu sehen besteht das Schutzsystem aus drei miteinander verbundenen Teilen aus verschiedenen Werkstoffen. Diese sind die Schutzplatte aus Kohlenstoffwerkstoff, die Isolationsplatte aus AV 1800- Keramik und die Metallplatte für die Befestigung. Die Auswölbung des Schutzsystems ergibt sich aus der Gesamtkonstruktion (Position und Form des Kupfers, Winkel der Lavalldüsen).

Wie schon beschrieben wird der Schutz des Kopfes vor dem chemischen Angriff der Schlacke durch die Schutzplatte durchgeführt. Als Material für diese Platte sind wegen ihrer geringen


<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik Montanauniversität A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH) Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	--

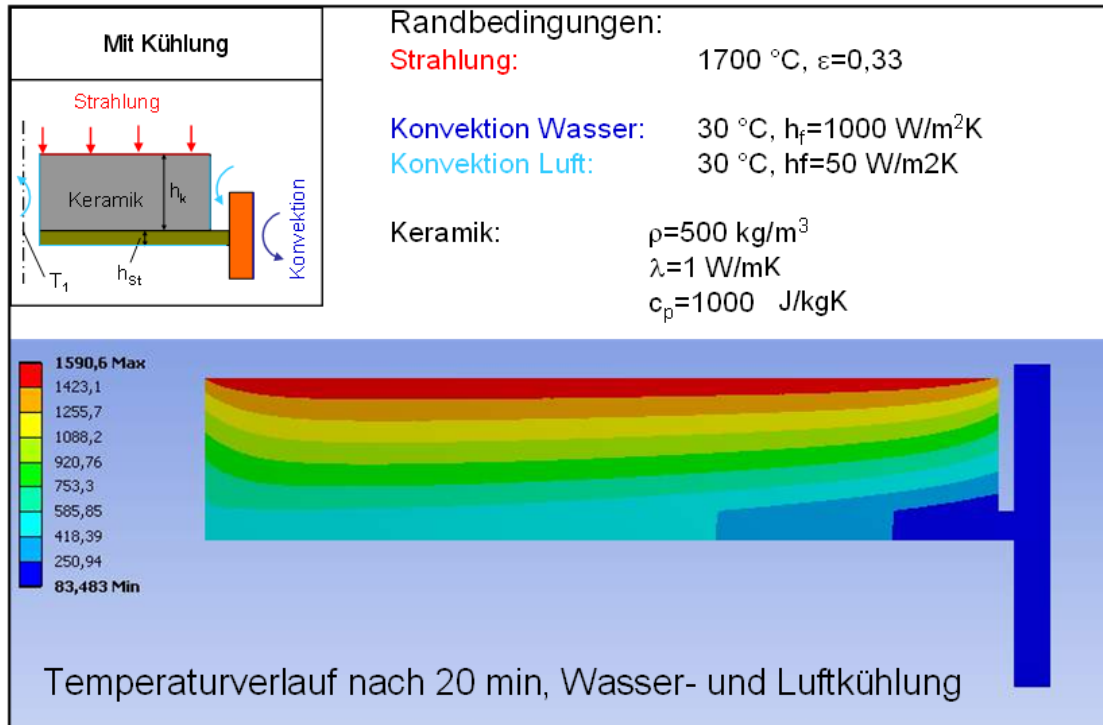
Benetzbarkeit mit Schlacken und Metallschmelzen aber auch wegen ihrer guten Korrosionsbeständigkeit in einer reduzierenden Atmosphäre die Kohlenstoffwerkstoffe vorgesehen. Da Kohlenstoffwerkstoffe aber mit dem Sauerstoff in der Umgebung reagieren (Verbrennen), ist ein Schutz der Platte durch Schutzgas unbedingt erforderlich. Sollte dies nicht perfekt erfolgen, so ist ein starker Verschleiß der Schutzplatte während des Einsatzes zu erwarten. Im welchen Ausmaß dies erfolgt, lässt sich in unseren Anwendungsfall aufgrund der schon beschriebenen Komplexität des Prozesses nur experimentell festlegen. Deswegen ist die Schutzplatte auch als ein schnell austauschbares und billiges Verschleißteil ausgelegt. Auch die Wandstärke der Schutzplatte, die zwischen 1 und 20 mm betragen kann, kann aufgrund des experimentell zu ermittelnden Verschleißbildes optimiert werden. Zur weiteren Optimierung und damit Verlängerung der Lebensdauer der Schutzplatte sind mehrerer Löcher oder Schlitze in der Platte vorgesehen, damit das Schutzgas möglichst ungehindert die Schutzplatte bedecken bzw. durchströmen kann. Die Kühlwirkung des Schutzgases ist wegen seiner niedrigen Wärmekapazität und wegen der geringen Wärmeübergangskoeffizienten gering.

Die Verbindung der Schutzplatte mit der Isolations- und mit der metallischen Befestigungsplatte erfolgt durch Bolzen, die aus einem Kohlenstoffwerkstoff gefertigt sind. Um ein Herausfallen der Bolzen zu verhindern werden sie hinter der metallischen Platte eingeklemmt und verklebt. Da sie, wie auch die Schutzplatte, eine relativ hohe Wärmeleitfähigkeit aufweisen, und dadurch die Wärme aus der Umgebung bis zur metallischen Teilen geleitet wird, werden sie von metallischen Teilen mit einem isolierenden keramischen Kleber getrennt. Die Klemmverbindung der Bolzen wird dabei aus ebenfalls schlecht wärmeleitenden FW12- Keramik ausgelegt. Die Form der Platten bietet für diese Steckverbindungen ausreichend Platz. Die Befestigungsbolzen, wie auch die Toleranzen der Bohrlöcher in den Platten (zum Ausgleich der Dehnungsunterschiede aufgrund der verschiedenen Ausdehnungskoeffizienten der unterschiedlichen Werkstoffe) können sehr großzügig gewählt werden. Da die Schutzplatte nur auf der Isolationsplatte gelegt ist und keine feste Verbindung mit der Isolationsplatte hat, sind keine Probleme aufgrund der unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten der Werkstoffe zu erwarten.

Auch bei der Wahl der Wandstärke der metallischen Befestigungsplatte ist eine große Freiheit vorhanden. Die Platte aus dem temperaturbeständigen Stahl X5CrNi18-10- wird mittels temperaturbeständiger metallischer Schrauben am wassergekühlten Kupferteil befestigt. Dadurch soll möglichst viel Wärme aus der Isolationsplatte abgeführt werden.

Bei der Wahl der Wandstärke der Isolationsplatte wurde besonders darauf geachtet, möglichst wenig Wärme aus der Umgebung an die metallische Platte durchzulassen. Dazu wurden ebenfalls verschiedene Modelle am ISFK der MU Leoben berechnet und analysiert. Für die Wärmeleitfähigkeit der FW12- Keramik wurde laut Datenblatt der (sehr niedrige) Wert 1 W/mK (bei 1500 °C) verwendet. Abb.78 [72].

<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik Montanauniversität A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH) Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	--




**Abb. 78:** Prinzipmodell und Ergebnisse der FEM- Analysen für die Isolierungsplatte[72].

Bei diesen Analysen wurden grundsätzlich verschärfte Bedingungen angenommen:

- Stationärer Temperaturzustand nach 20 min im Konverter,
- Außentemperatur: 1700 °C,
- Strahlungsübergang zwischen den Schichten mit max. Emissionskoeffizient von 1,
- Wandstärke der Isolationsplatte: 20mm,
- Für die Isolationsplatte wurde eine relativ hohe Wärmeleitfähigkeit verwendet (im Vergleich zum Datenblatt), um ev. Strahlungstransport durch die Isolationsplatte zu berücksichtigen.

In der Rechnung wurde in den Zwischenräumen (Schutzgas zwischen den Platten) ein moderater Wärmeübergangskoeffizient von 50 W/m<sup>2</sup>K angenommen (er ist vermutlich höher). Aufgrund der Kühlwirkung des Schutzgases wurde in der Simulation ein aufgeheiztes Schutzgas von 100 °C verwendet.


Ergebnisse der FE-Analysen der Isolationsplatte zeigen, dass sich ihre Frontseite sehr schnell erwärmt. Da aber auch die Frontseite der Platte Wärme abstrahlt und wegen der kühlenden Wirkung des Schutzgases bleibt (wie bei der Düsenspitze) die Temperatur an der Stirnseite etwa 100 bis 200°C unter der Temperatur der Umgebung (1700°C). Aufgrund der niedrigen

<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik Montanauniversität A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH) Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	--

Wärmeleitfähigkeit des hier eingesetzten Werkstoffes nehmen die Temperaturen im Inneren der Isolationsplatte rasch ab und sind im Kontaktbereich mit der Stahlplatte auch nach 20 Minuten nur geringfügig größer als die Temperatur des Schutzgases.

Es sei nochmals erwähnt, dass alle drei Platten nicht fest miteinander verbunden sondern nur schwach verklemmt sind. Daher sind aufgrund der unterschiedlichen Wärmedehnungen der Platten keine gefährlichen mechanischen Spannungen zu erwarten.

Auch bei der Isolationsplatte sind noch viele Verbesserungsmöglichkeiten vorhanden. So könnte die Wandstärke der Platte fast verdoppelt werden (von 20 mm auf 40 mm). Weiteres könnten Bohrungen oder Schlitze eingebracht werden, damit etwas Schutzgas durchströmen kann. Dies würde etwas zur Kühlung beitragen. Der Werkstoff ist außerdem in verschiedenen Dichten herstellbar. Dadurch könnte die Wärmeleitfähigkeit weiter verringert werden.

<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik Montanauniversität A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH) Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	--

## 9. Experimentelle Durchführung

Neben den theoretischen Untersuchungen wurden im Rahmen dieser Arbeit auch experimentelle Arbeiten durchgeführt. Aufgrund der Komplexität der hier gestellten Aufgabe und des Prozesses selbst wurden diese Tests schrittweise ausgelegt. Als erstes wurden einige Laborversuche an Werkstoffen und Komponenten durchgeführt. Ziel dieser Versuche war vor allem die Untersuchung der Eigenschaften der ausgewählten Materialien, ihren Geometriestabilität und ihrer Eignung zur Fertigung der Teile. Als erstes wurden die Werkstoffe für die Lavaldüsen und für die Isolationsplatte ausgewählt. Sie wurden an der ISFK in Leoben auf ihre Thermoschockbeständigkeit untersucht. Weiteres wurde die zusammengebaute Lavaldüse (in ihrer Originalgröße) bei Siemens CT auf ihre strukturelle und chemische Stabilität durch zyklische Temperaturwechselbelastungen getestet. Die mechanische Stabilität einer zusammengebauten Lavaldüse wurde bei der voestalpine Stahl AG auch beim Durchströmen von Luft unter industriellen Bedingungen (große Drücke und Mengen) und dadurch die daraus resultierenden starken Vibrationen getestet.

Der erste Prototypentest der Gesamtkonstruktion wurde an einem 100 Kg Laborkonverter bei der RWTH in Aachen durchgeführt. Ein weiterer Test unter Betriebsbedingungen sollte beim AME (Arcelor Mittal Eisenhüttenstadt) an einem 170 t LD-Konverter in Eisenhüttenstadt durchgeführt.

Der Aufbau, Ziele und die Ergebnisse dieser Versuche werden in den nächsten Kapiteln beschrieben.

## 9.1 Thermoschockversuche




**Abb. 79:** Aufheizen der würfelförmigen Proben mit einem Acetylschweißbrenner, aus [73].

Im Rahmen eines gemeinsamen Projektes mit Siemens VAI wurden am ISFK verschiedene Keramikfaserwerkstoffe auf ihre Temperaturwechselbeständigkeit untersucht [73]. Dies erfolgte in Anlehnung an EN 993-11, [74]. Als Proben wurden Würfel von zwei verschiedenen mit etwa 2 cm Kantenlänge hergestellt. Die würfelförmigen Proben der Isolationsmaterialien von ALFATEC und KAGER wurden auf Anregung der Hersteller ein- oder beidseitig entweder mit einer Beschichtung (APO 80/20) oder mit Keramikblech (AVR 1415N) verstärkt. Dadurch sollte geprüft werden, ob Beschichtungen zur Erhöhung der Temperaturwechselbeständigkeit beitragen. Eine Übersicht über die von Siemens VAI zur Verfügung gestellten Proben (2 Materialien, je 3 Proben) zeigt Abb. 80:

Anders als in der Norm wurden die Proben aber nicht in einem Ofen sondern mit einem Acetylen- Schweißbrenner auf aufgeheizt (siehe Abb. 80) und dann an Luft abgekühlt. Die Temperatur in der Brennerflamme beträgt bis zu 2.800 °C. Die Temperatur an der Rückseite der Proben wurde mit einem Pyrometer gemessen. Der Vorgang wurde 1 bis 3-mal wiederholt.

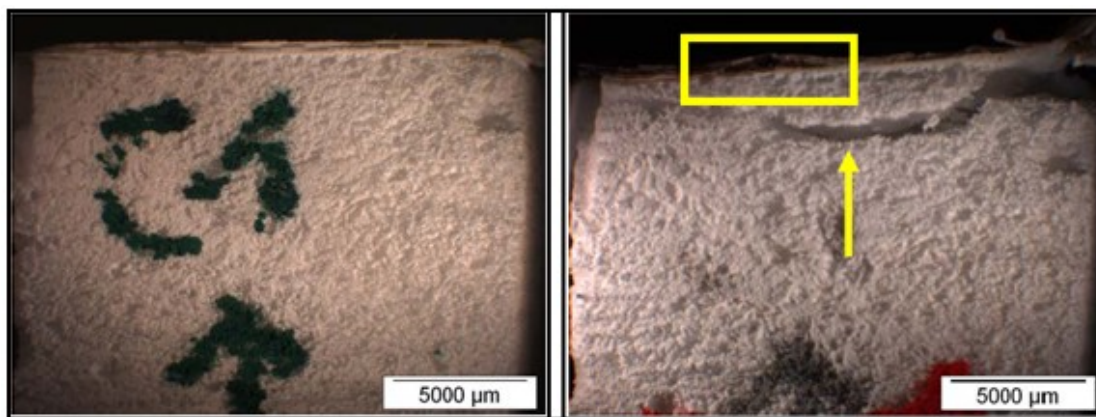


<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik Montanauniversität A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH) Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	---

Material	ISFK-Bezeichnung	Bemerkung
ALFATEC AV1700/400	C1-C3	beidseitig Keramikblech AVR 1415N - einseitig beim Bearbeiten abgeplatzt
ALFATEC AV1700/400	D1-D3	2 Seiten Beschichtung APO 80/20
ALFATEC AV1700/400	E1-E3	beidseitig Keramikblech AVR 1415N, Beschichtung APO 80/20
KAGER	F1-F3	beidseitig Keramikblech AVR 1415N
KAGER	G1-G3	2 Seiten Beschichtung APO 80/20
KAGER	H1-H3	beidseitig Keramikblech AVR 1415N, Beschichtung APO 80/20

**Abb. 80:** Eckdaten der von Siemens VAI zur Verfügung gestellten Proben.

In Abb. 81 sind Teile der Oberflächen der Proben vor und nach dem Versuch dargestellt:



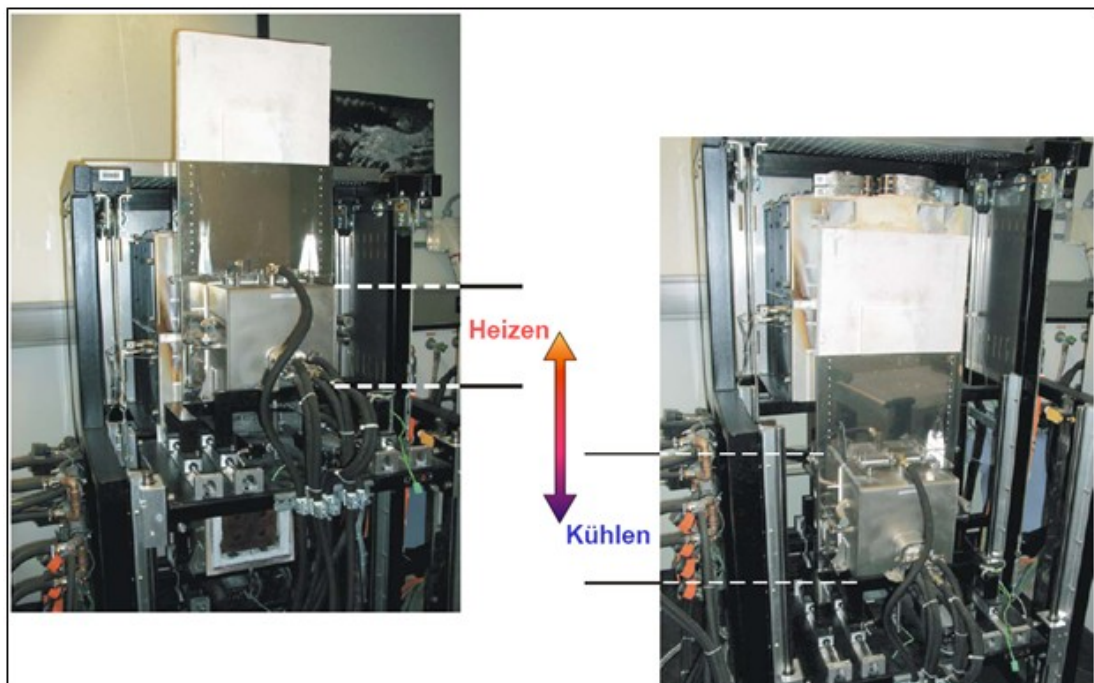
**Abb. 81:** Oberflächen von Proben vor (links im Bild) und nach dem Versuch (rechts im Bild), [73].

Bei allen untersuchten Proben lösen sich die auf den Isolierstoff aufgetragenen Materialien (Keramikblech AVR 1415N bzw. die Beschichtung APO) nach wenigen Zyklen vom Substrat ab. Weiteres schmolzen die Proben an den Rändern teilweise auf und es entstanden Risse im Isolationsmaterial. Diese starken Schäden (Risse und das Ablösen vom Substrat) sind auf die unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten von Substrates und Beschichtung zurückzuführen. Das Aufschmelzen der Materialien an den Rändern der Proben ist durch die starke Überhitzung (weit über der Einsatztemperatur) durch den Acetylen- Schweißbrenner entstanden.

Zusammenfassend wurde festgestellt, dass eine direkte Verstärkung der getesteten Teile durch Beschichten mit anderen Materialien für unsere Anwendung nicht als sinnvoll erscheint. Die Isolationsplatte wurde daher bei den weiteren Tests nur zwischen der metallischen Befestigungsplatte und der Schutzplatte eingeklemmt.

## 9.2 Thermoschockversuche an der Lavaldüse

Um die Verbindung zwischen den keramischen und metallischen Teilen der neuen Lavaldüse zu überprüfen wurde eine zyklische Temperaturwechselbelastung durchgeführt. Dies erfolgte in einer Apparatur, die in Zusammenarbeit mit dem Autor bei Siemens CT konzipiert wurde. Die Apparatur besteht aus einer an einer Seite offenen Ofenkammer und einer vertikal und horizontal verfahrbaren gekühlten Kammer. Die Probe wird an die Vorderseite der Kühlkammer montiert, so dass in der Heizposition die Probenvorderseite in den Ofenraum hineinragt und diesen abschließt. Gleichzeitig wird die Probenrückseite von der Kühlkammer über eine wassergekühlte Platte und wahlweise durch strömende Luft gekühlt. Über die Leistungsregelung der Heizelemente und die Position der Kühlplatte / Kühlluftstrommenge kann der gewünschte Wärmestrom und damit der Temperaturgradient in der Probe über einen weiten Bereich eingestellt werden. Durch Wegschieben der Kühlkammer wird die Vorderseite der Probe vor die offene Seite einer weiteren Kühlkammer positioniert, die identisch wie die verfahrbare Kühlkammer aufgebaut ist. Durch wechselseitiges Verschieben der Kühlkammer zwischen der Heiz- und der Kühlposition können Temperaturwechsel in der Probe erzeugt werden. In der Abb. 82 wird der Prüfstand in seiner Heiz- und Kühlposition gezeigt:



**Abb. 82:** Teile des Prüfstandes von Siemens CT in seiner Heiz- und Kühlposition.

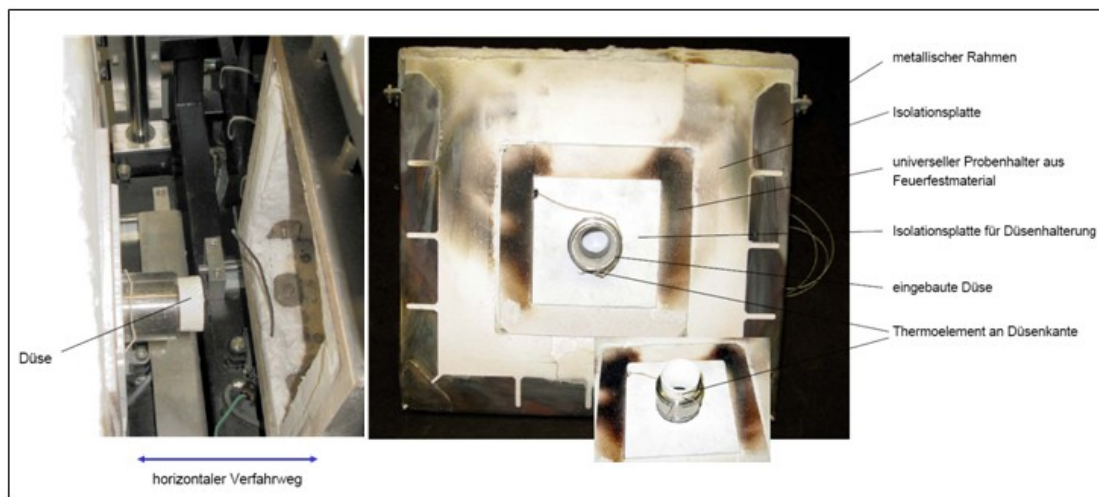
Der Prüfstand wird programmgesteuert betrieben und kann unbeaufsichtigt über mehrere Tage laufen. Das Zeitregime und die Anzahl der Zyklen, die Temperaturen, die Verfahrenszeiten



und die Abschaltkriterien wurden über einen Rechner definiert. Die mittels Thermoelementen erfassten Temperaturen wurden aufgezeichnet.

Für die Halterung der Düse wurde eine Stahlplatte mit Gewindebohrung angefertigt, welche in der vorhandenen keramischen Probenhalterung aus Feuerfestkeramik befestigt werden kann. Die Düse wurde in diese Stahlplatte eingeschraubt. Zur thermischen Isolierung der Stahlplatte wurde eine Blende aus polykristalliner keramischer Wolle verwendet. Damit keine Kühlluft aus der Kühlkammer in den Ofenraum gelangt, wurde die Düse ebenfalls mit der keramischer Wolle verschlossen.


Zur Messung der Temperatur wurde ein Thermoelement an der vorderen Kante der faserverstärkten Keramik appliziert. Befestigt wurde es mit einem Keramikkleber auf Aluminiumoxid-Basis. Ein weiteres fix angeordnetes Thermoelement diente zur Messung der Temperatur an der gekühlten Rückseite des metallischen Düsenrohrs. Diesen zeigt Abb.83:



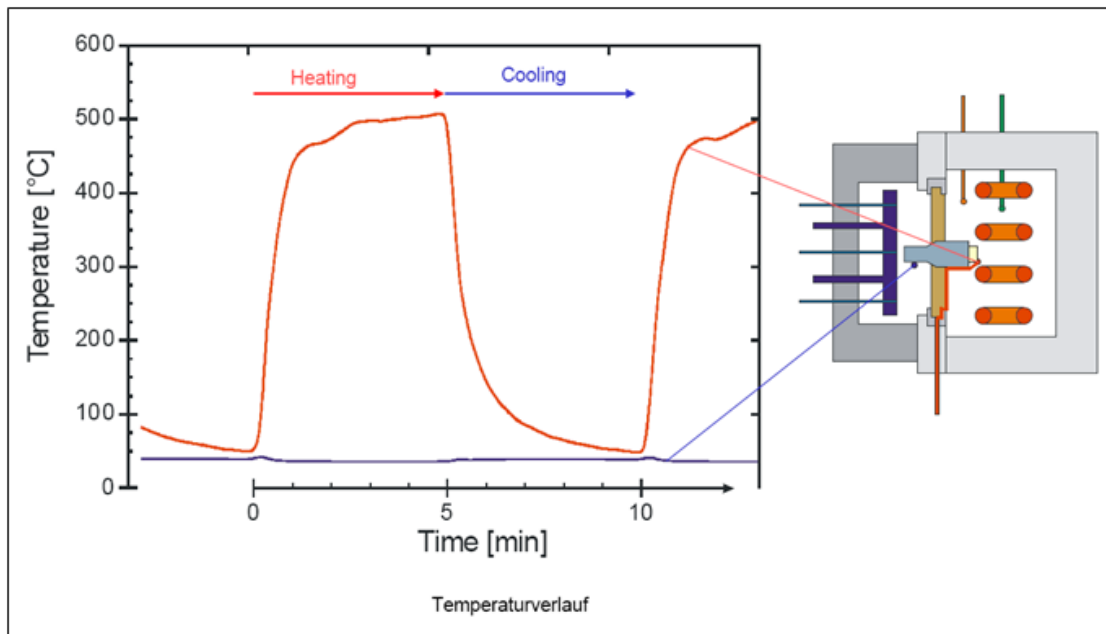
**Abb. 83:** Einbau der Testdüse im Prüfstand.

Die Temperaturbelastung wurde so eingestellt, dass eine Maximaltemperatur von 500°C an der Düsenkante (und in den Stahlteilen) erreicht aber nicht überschritten wird. Um einen möglichst hohen Temperaturgradienten im Bauteil zu realisieren wurde der rückseitige Kühlluftstrom dauerhaft eingeschaltet. Die Belastung setzt sich aus zwei Teilen zusammen. In der 5-minütigen Heizphase befindet sich die keramische Düse in der Ofenposition und wird auf ca. 500 °C aufgeheizt, während die Rückseite durch den Luftstrom und die wassergekühlte Platte auf einer Temperatur kleiner 40 °C gehalten wird.

Im Anschluss an die Heizphase erfolgt das automatische Verfahren in die Kühlposition, wobei die keramische Düse innerhalb von 5 min auf ca. 50 °C abgekühlt wird. Zum Ende der Kühlphase ist die Temperatur im Bauteil nahezu homogen. Ein Belastungszyklus dauert 10

<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik Montanauniversität A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH) Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	--


min. Insgesamt wurden 100 Zyklen gefahren. Die Temperatur über der Zeit wird in der Abb. 84 gezeigt:

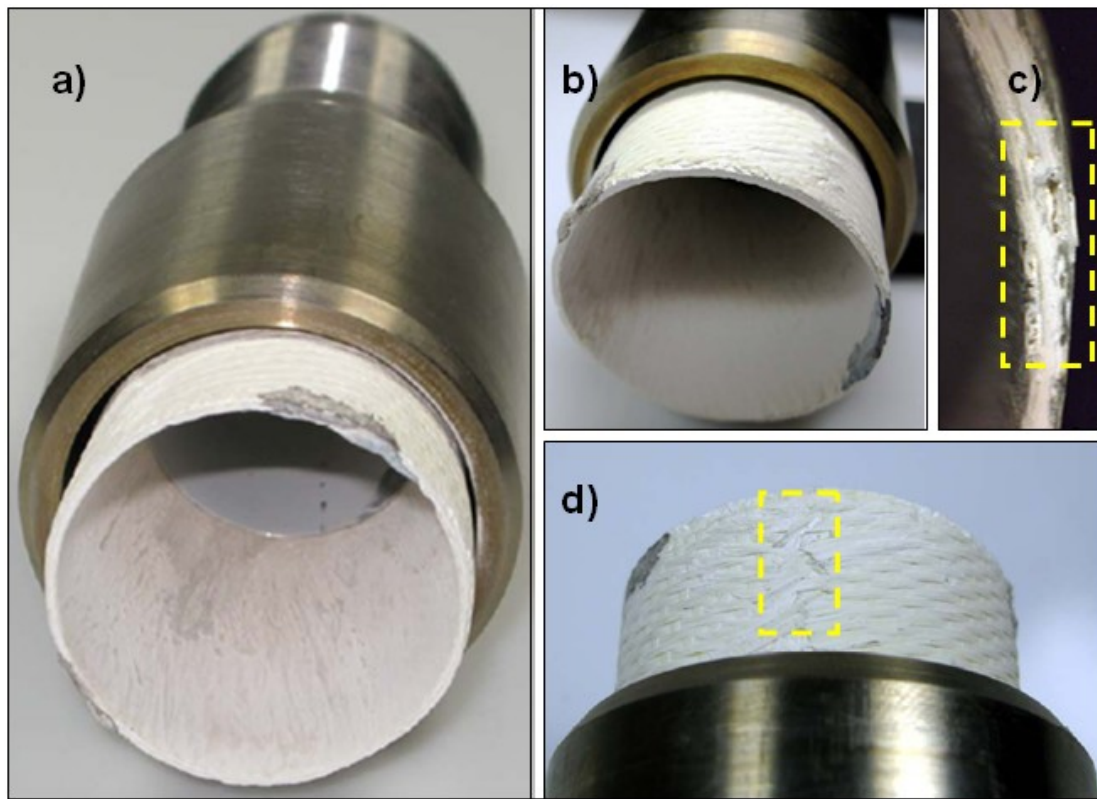


**Abb. 84:** Temperaturverlauf während eines Belastungszyklus.

Nach der zyklischen Belastung wurde das Bauteil ausgebaut und visuell unter dem Lichtmikroskop inspiziert. Dabei wurden makroskopisch nur geringfügige Schädigungen festgestellt (siehe Abb. 85 a und b). Die hier verwendete silikatische Kleber (OMEGABOND® 500), der Düse in der Metallhülse hält, hatte sich durch die zyklische Belastung aber gelockert. An der Kante der Düse konnten im Stereomikroskop kleine Abplatzungen erkannt werden, an denen die feinkörnige Matrix abbröckelt (siehe Abb. 85 c). An einigen Stellen sind offen liegende Faserbündel zu erkennen (siehe Abb. 85 d).



<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik Montanauniversität A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH) Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	--



**Abb. 85:** Die neue Lavaldüse vor und nach 100 Temperaturwechsln.

Die Belastung der Düse mit maximal 500 °C stellt keinen kritischen Belastungszustand für das Bauteil dar. Allerdings zeigen sich nach 100 Zyklen erste Hinweise auf potenzielle Schwachstellen, welche bei einer stärkeren Belastung (höhere Temperatur, Kontakt mit der heißen Schmelze, Einfluss des strömenden Sauerstoffs) zu Ausfällen führen könnten. Offensichtlich ist die Matrix, in welche die Mullitfasern eingebettet sind, nicht sehr fest. Insbesondere die stark belastete Kante ist sehr anfällig für ein Ausbröckeln der Matrix. Es ist zu erwarten, dass durch Abplatzungen verstärkt Faserbündel freigelegt werden, welche bei hoher Temperatur schnell verspröden und bei mechanischer Belastung leicht abbrechen. Inwieweit dies die geforderte Strahlqualität des Gasstroms beeinflusst, kann zurzeit nicht beurteilt werden.

Die hier verwendete Verklebung der keramischen Düse mit der metallischen Hülse wird den Belastungen im Einsatz vermutlich nicht standhalten. Daher wird die Verbindung durch eine Klemmung erfolgen. Sollte sich der Strahl stärker als im vorliegenden Test erwärmen, so müssen andere Vorkehrungen (wie thermisches Beschichten der metallischen Teile) gegen ein Lockern der Verbindung vorgesehen werden.



### 9.3 Druck- und Strömungsversuche an der Lavaldüse

Zweck dieser Untersuchung war, die neue Lavaldüse aus keramischem Vorder- und metallischem Hinterteil auf ihre mechanische Festigkeit bei Beanspruchung durch das mit Überschallgeschwindigkeit ausströmende Gas und die damit verbundenen Vibrationen und sonstigen Beanspruchungen zu prüfen. Die Druck- und Strömungsversuche einer prototypischen Lavaldüse erfolgten in einer Apparatur, die vom Autor speziell für diesen Test konzipiert wurde. Die Apparatur besteht aus einer Stahlkonstruktion, die als Träger einer Lanze und der darauf befestigten Testdüse dient. Die Testdüse wird an die Vorderseite der verfahrbaren Lanze montiert, so dass die Verbindung gleich wie bei der echten Sauerstofflanze ist. Die aus Metall gefertigte Lanze wird über strömende Luft gekühlt. An die Befestigungslanze wurde ein Hochdruckschlauch angeschlossen. Der Durchmesser dieses Schlauches wurde größer als jener der Lavaldüse gewählt, um den Druckabfall an der Düse gering zu halten. In der Abb. 86 ist der Aufbau des Teststandes gezeigt:

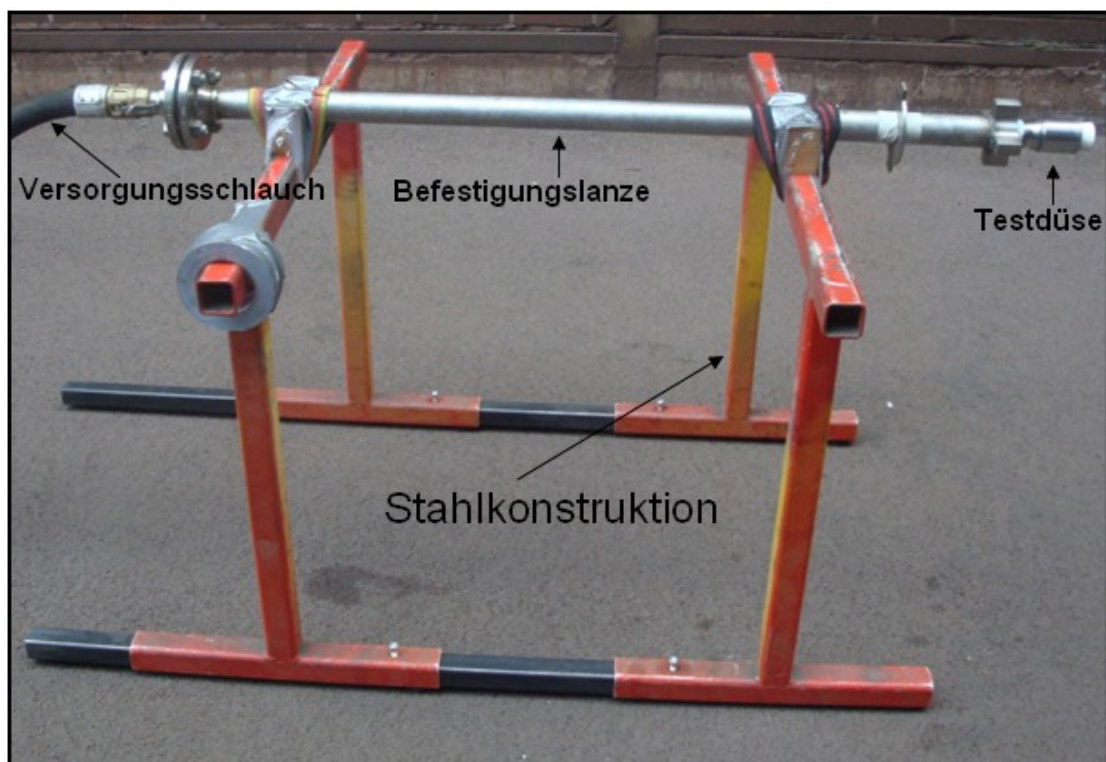


Abb. 86: Einbau der Testdüse im Prüfstand bei voestalpine Stahl AG.

Die Beanspruchung der Testdüse erfolgte durch den starken Druck des strömenden Gases (Luft bis 7 bar) und durch die Vibrationen, die durch den Luftstrom entstehen. Der Druck wurde bewusst stark erhöht (im Vergleich zu den Bedingungen im Stahlwerk), um die Düse





dadurch extrem zu beanspruchen. Die Befestigungslanze wurde auch relativ locker an die Stahlkonstruktion befestigt, um Vibrationen der Düse zu begünstigen.

Am Anfang des Versuchs wurden die Drücke langsam (durch einen Druckregelventil) vom kleinsten bis zum maximalen Wert angehoben. Bei einem Druck von 7 bar wurden circa 2000 m<sup>3</sup>/h Luft durch die Testdüse gepresst (siehe Abb. 87). Neben den Druck- und Mengenmessungen wurde der gesamte Testverlauf mittels Videokameraaufnahmen dokumentiert.

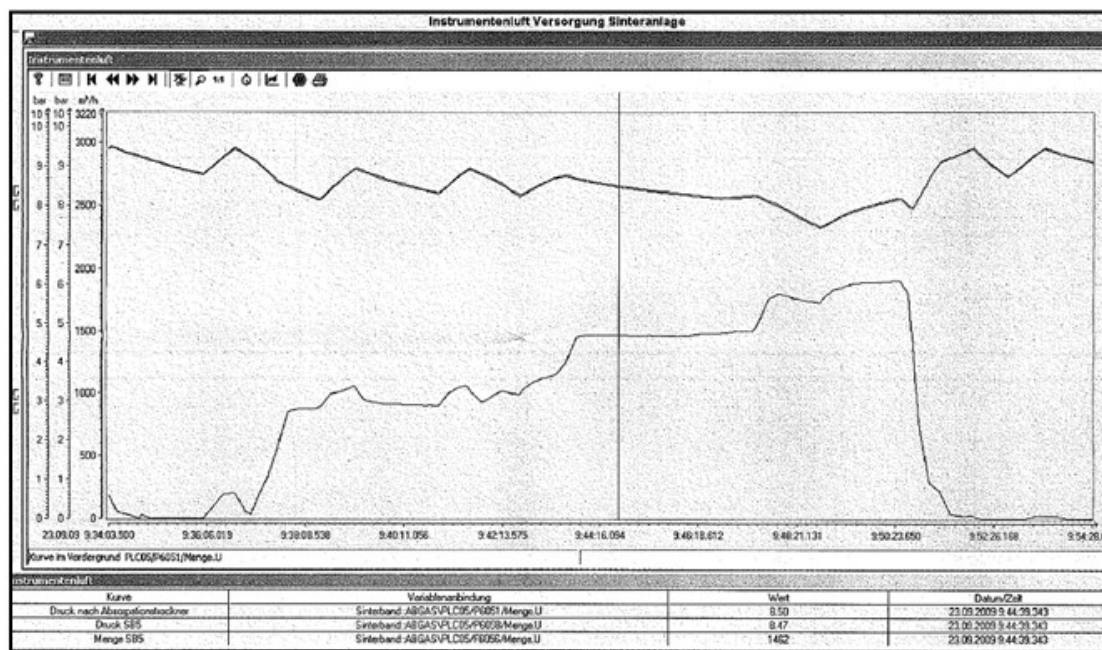


Abb. 87: Luftdruck und Flussmengen bei einem Test der Lavaldüse.

Die keramische Düsen Spitze wurde vor dem Versuch an den kritischsten Stellen (im Bereich des Überganges zwischen dem Stahlteilen und der Keramik und die Kanten der Düsen Spitze) mit Farbe markiert. Da auch beim späteren beabsichtigten Test der Sauerstoffflanze im Stahlwerk die Düsen mit BN beschichtet werden sollten, wurden diese auch bei diesen Versuchen mit BN beschichtet. Dabei sollte die Haftung der BN- Schicht an der Düsenoberfläche wurde untersucht.

Während des Versuches wurde auch ein Nebelfluid aus einer gebräuchlichen Nebelmaschine vor der Düsen Spitze erzeugt. Mit dieser Vorgehensweise wurde der im Kapitel 4. beschriebener Effekt des Einsaugens der Umgebungsmedien durch den Luftstrahl optisch dargestellt. Durch den hohen Luftdruck und die große Strömungsgeschwindigkeit wurde ein sehr starker Unterdruck an der Düsen Spitze erzeugt. Dadurch wurde der Nebel auch aus größeren Distanzen (0,5 m) in die Düsen Spitze gezogen; siehe Abb. 98.

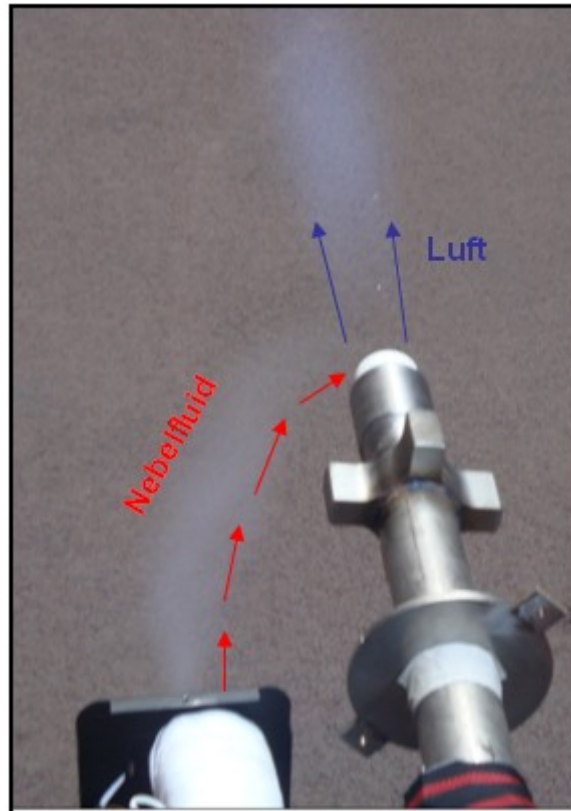

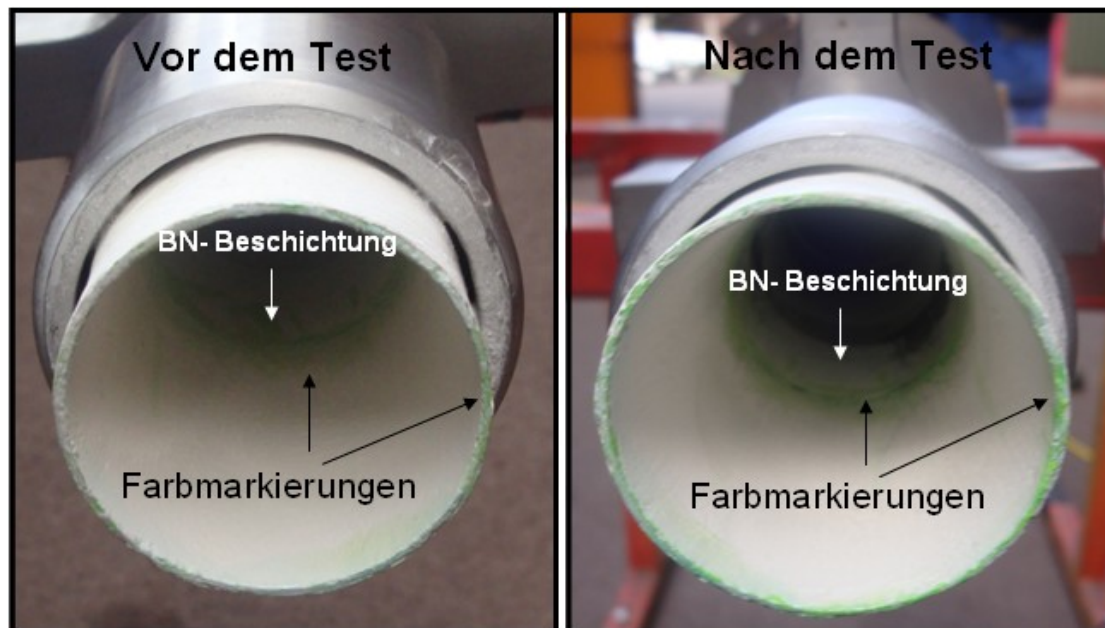


Abb. 88: Das Nebelfluid wird in den Luftstrom gezogen.

Nach der Durchführung des Versuchs (15 Minuten) wurde das Bauteil ausgebaut und inspiziert. Dabei wurden erneut keine makroskopisch erkennbaren Risse oder Schädigungen gefunden (siehe Abb. 89). Auch die aufgetragene Farbe und die BN- Beschichtung waren nach dem Test noch vorhanden. Es wurde auch keine Lockerung der Keramik in der Metallhülse festgestellt. Auch an der Kante der Düse wurden keine Materialabplatzungen gefunden. Aus diesen Gründen wurden keine weiteren Untersuchungen vorgenommen. Die Testdüse vor- und nach dem Versuch wird in Abb. 89 gezeigt.

<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik Montanauniversität A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH) Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	--



**Abb. 89:** Die Düse zeigt nach dem Test (Dauer 15 min, 7 bar Druck und 2000 m<sup>3</sup>/h Luft) keine sichtbaren Beschädigungen.


Zusammenfassend kann man sagen, dass in diesem Versuch die Belastungen der Düse durch die strömende Luft ohne Beschädigungen ertragen wurden, obwohl die vorgegebenen Drücke, höher als im Stahlwerk waren. Auch die BN Beschichtung wurde durch diese Belastungen nicht beschädigt. Daraus wird geschlossen, dass diese Art von Beanspruchung von der neuen Düse auch im Stahlwerk ertragen werden kann.

#### 9.4 Versuche an Prototypen des neuen Lanzenkopfes an der RWTH in Aachen

##### Modellierung des Temperaturverlaufes in den Lanzenköpfen

Um die Temperaturen und die damit verbundenen Beanspruchungen im Lanzenkopf (Schale und die Düsen) vor dem Versuch abzuschätzen wurden Modellrechnung durchgeführt. Der Lanzenkopf wurde dabei als unendlich ausgedehntes Rohr modelliert, dem aufgrund der Strahlung von außen eine Temperatur aufgeprägt wird, und das von innen und außen durch das Schutzgas gekühlt wird. Es wurden folgende Annahmen getroffen:

**Geometrie:** Um die Wärmeleitung durch die Wand des Versuchslanzenkopfes zu beschreiben wurde er als unendliches Rohr modelliert. Die Dimensionen des Rohres sind denen des Kopfes (für den Versuch in Aachen) nachempfunden: Innenradius 18 mm, Außenradius 20 mm (Wandstärke somit 2 mm)

<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik Montanauniversität A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH) Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	---

**Materialdaten:** Die Materialdaten entsprechen den Werten einer faserverstärkten Oxidkeramik. Die Abhängigkeit von der Temperatur wurde nicht berücksichtigt: Wärmekapazität 500 J/kgK, Wärmeleitfähigkeit 1.2 J/mK, Massendichte 2300 kg/m<sup>3</sup>.

Die Wärmeleitungsgleichung in Zylinderkoordinaten lautet:

$$c_p \rho_m \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (1)$$

**Randbedingungen und Anfangsbedingungen:** Für die Innenseite des Rohres wurde ein konvektiver Wärmeübergang mit dem Schutzgas ( $h_{in} = 100 \text{ W/m}^2\text{K}$ )


$$q_{in} = -k \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_{in}} = h_{in} \cdot (T_{Gas} - T_{r_{in}}) \quad (2)$$

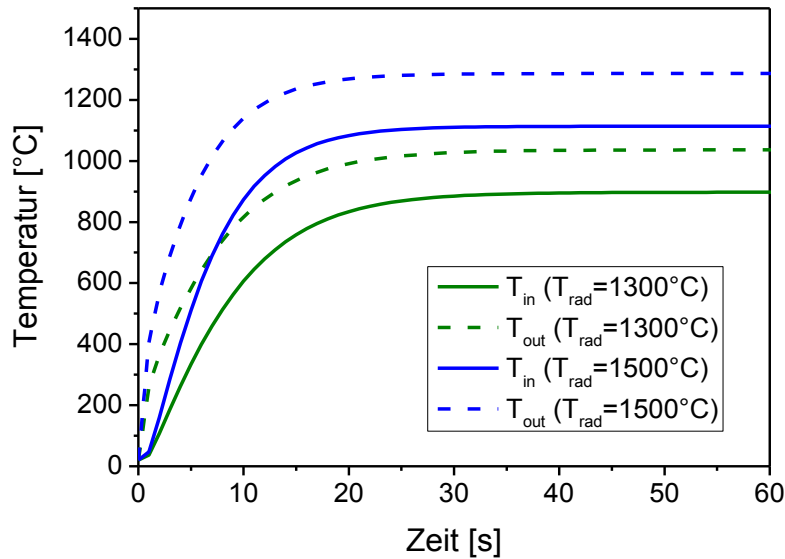
und an der Außenseite ebenfalls ein konvektiver Wärmeübergang mit dem Schutzgas ( $h_{out} = 100 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) und zusätzlich eine Erwärmung durch Strahlung (Schwarzkörperstrahlung mit der Strahlungstemperatur  $T_{rad}$ ) angenommen:

$$q_{in} = -k \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_{out}} = h_{out} \cdot (T_{Gas} - T_{r_{out}}) + \epsilon_{SB} (T_{rad} - T_{r_{out}}) \quad (3)$$

Die Erwärmung des Gases wurde vernachlässigt. Für die Temperatur des Schutzgases wurde 20 °C (bzw. 300 °C) angenommen. Die Anfangstemperatur des Rohres wurde gleich der Temperatur des Schutzgases gesetzt.

Abb.90 zeigt den Temperaturanstieg über der Zeit, wobei für die Strahlungstemperatur 1300 °C bzw. 1500 °C angenommen wurden. Man erkennt einen sehr steilen Temperaturanstieg. Bereits nach etwa 15 s stellt sich ein Gleichgewicht ein, d.h. die Temperaturen im Rohr bleiben konstant. Die Temperatur an der Außenseite des Rohres beträgt dann etwa 1300 °C und an der Innenseite 1100 °C (für eine Strahlungstemperatur von 1500 °C), d.h. das Rohr ist innen um etwa 200 °C kühler als außen. Dies ließ hoffen, dass die innen liegenden Teile des Lanzenkopfes (metallische Fixierungen, Rohrleitungen für das Schutzgas, Thermoelemente, ...) die Versuche in Aachen überleben werden, obwohl die Wand des Lanzenkopfes sehr dünn ist. Bei dickeren Wänden sollte die Zeit bis zum Erreichen des Gleichgewichtes etwa mit dem Quadrat der relativen Dickenzunahme zunehmen und bei einer Wanddicke von etwa 20 mm etwa 1500 s (25 Minuten) betragen. In so einem Fall würde bei einem etwa 2 min dauernden Blasevorgang das Gleichgewicht nicht erreicht und die Temperatur auf der Innenseite der Keramik deutlich hinter der Gleichgewichtstemperatur zurückbleiben.

<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik Montanauniversität A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH) Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	--



**Abb. 90:** Entwicklung der Temperatur in einem innen und außen durch Schutzgas gekühltem Rohr (Faserkeramik, 2 mm Wandstärke) bei einer Strahlungstemperatur von 1300 °C (grün) bzw. von 1500 °C (blau). Die weiteren Modellannahmen findet man im Text. Aufgetragen ist jeweils der Temperaturverlauf an dem Innen – (ausgezogene Kurven) und Außenseite (strichliert) des Rohres. Nach etwa 15 - 20 s stellt sich eine nahezu gleichbleibende Temperatur ein (Gleichgewicht). Durch die Isolationswirkung des Rohrs und die Kühlung ist die Temperatur auf der Innenseite deutlich geringer als an der Außenseite.

In der Abb. 93 sind die Gleichgewichtstemperaturen an der Rohrrinnen- und Außenseite über der Strahlungstemperatur aufgetragen. In diesem (stationären) Fall vereinfacht sich Glg. 1 auf die stationäre Lösung

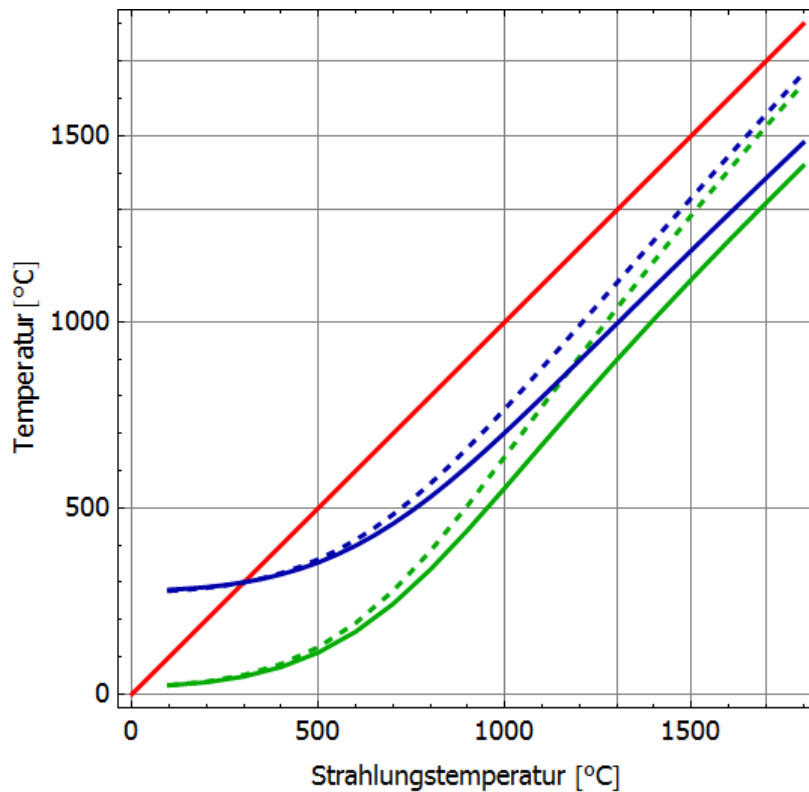
$$\frac{d^2T}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT}{dr} = \quad (4)$$

Die rote Linie zeigt den Temperaturverlauf im Rohr ohne Kühlung durch das Schutzgas. Hier ist die Materialtemperatur gleich der Strahlungstemperatur. Bei den grünen Kurven ist die Temperatur des Schutzgases 20 °C; bei den blauen Kurven 300 °C. Die Temperaturen an der Innenseite sind ausgezogen und die an der Außenseite gestrichelt gezeichnet. Durch das Schutzgas wird das Rohr gekühlt, wobei bis zu einer Strahlungstemperatur von etwa 700 °C der Kurvenverlauf durch die Kühlung durch das Schutzgas und bei höheren Temperaturen durch die Erwärmung durch die Strahlung geprägt wird. Bei einer Strahlungstemperatur von 1000 °C beträgt die Temperatur an der Außenwand des Rohres im Gleichgewicht etwa 780 °C (bei einer Gastemperatur von 300 °C) bzw. 650 °C (bei einer Gastemperatur von 20 °C). Die entsprechenden Temperaturen an der Innenwand betragen etwa 720 °C bzw. 560 °C. Bei einer Strahlungstemperatur von 1300 °C betragen die entsprechenden Werte etwa 1200 °C bzw. 1050 °C außen und etwa 1000 °C bzw. 900 °C innen. Bei einer Strahlungstemperatur von 1700 °C betragen die Werte etwa 1550 °C bzw. 1520 °C außen und etwa 1400 °C bzw. 1300 °C innen. Bei sehr hohen Strahlungstemperaturen nähern sich die Außentemperaturen





der Strahlungstemperatur an. Die Innentemperaturen bleiben aber – je nach Temperatur des Schutzgases - etwa 300 °C bis etwa 400 °C unter der Strahlungstemperatur.



**Abb. 91:** Gleichgewichtstemperaturen an der Innen- und Außenwand des keramischen Rohres in Abhängigkeit von der Strahlungstemperatur. Die rote Linie zeigt die Temperatur in der Rohrwand (Dicke 2 mm) ohne Kühlung. Die grünen Kurven zeigen die Temperaturentwicklung für eine Schutzgastemperatur von 20 °C und die blauen Kurven für eine Schutzgastemperatur von 300 °C. Ausgezogen: Außentemperatur; strichliert: Innentemperatur.

Insgesamt zeigt dieses einfache Modell, dass auch bei dünnen Rohren im Inneren der Rohre ein effektiver Schutz vor den hohen Außentemperaturen möglich ist, wenn auch nur eine moderate Kühlung (Wärmeübergangskoeffizient  $100 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) durch ein Schutzgas vorhanden ist. Die Temperatur an der Innenseite des Rohres bleibt deutlich hinter der Strahlungstemperatur zurück. Dieser Effekt wäre bei Wandmaterialien mit geringerer Wärmeleitfähigkeit und bei dickeren Wänden noch stärker ausgeprägt.






## Experimentelle Durchführung

Für den Versuch bietet das Institut für Eisenhüttenkunde (IEHK), Lehrstuhl für Metallurgie von Eisen und Stahl, die Möglichkeit von Experimenten in einem kippbarer Versuchskonverter (Abb.92) mit einer Kapazität von 100 kg Roheisen an, der zur Simulation industrieller Konverterprozesse genutzt werden kann. Dabei wird das Roheisen in einem Induktionsofen aufgeschmolzen und anschließend in den Versuchskonverter chargiert. Dort wird mit einer Blaslanze Sauerstoff eingeblasen und das Roheisen unter Zugabe von Kalk gefrischt.



Abb. 92: Versuchskonverter des Instituts für Eisenhüttenkunde.

Die verwendete Lavaldüse der Blaslanze wurde mit Hilfe eines von Siemens VAI entwickelten Berechnungsprogramms konstruiert. Sie wurde für einen Volumenstrom von  $30 \text{ m}^3$  Sauerstoff pro Stunde bei einem Vordruck von 2,5 bar ausgelegt. Über die Einstellung des Vordruckes zwischen 2 und 3 bar war eine Variation des Volumenstromes an  $\text{O}_2$  entsprechend der Roheisenmenge, der Roheisenzusammensetzung, dem geforderten Endkohlenstoffgehalt sowie der Blasdauer möglich. Die Auskleidung des Konverters war

<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik Montanauniversität A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH) Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	--


sauer (Chromoxid-Basis). Zusätzlich verfügte der Konverter über zwei Zuleitungen zum Einblasen von Inertgas in den Boden.

Während des LD- Prozesses wurden Proben des Metalls und der Schlacken genommen, sowie eine Analyse des entstehenden Abgases und die Messung der Abgastemperatur vorgenommen. Weiteres wurden zur Beurteilung des Prozessverlaufes kontinuierliche Messungen der Abgastemperatur und seiner Zusammensetzung sowie stichprobenartige Messungen der Schmelztemperatur und Zusammensetzung durchgeführt. Durch zwei vom oben durch den Lanzenkanal eingebrachte Thermoelemente wurde die Temperatur an der Lanzenspitze gemessen. Alle Versuche wurden durch Videoaufnahmen dokumentiert.

Die Lanzenköpfe sowie eine geeignete Befestigungseinrichtung der Köpfe an der Blaslanze wurden vom Autor gefertigt und für die Versuche dem Institut für Eisenhüttenkunde übergeben. Der Ablauf dieser Versuche erfolgte nach folgendem Schema:

- Erschmelzen von 80 kg Hochofen-Roheisen in einem 100 kg Induktionsofen
- Aufheizen der Roheisenschmelze auf 1600 °C und Aufkohlung bis zur Kohlenstoffsättigung (~ 5,5 Gew.-%)
- Chargieren des flüssigen überhitzten Roheisens in den vorgeheizten Versuchskonverter
- Herunterlassen der Blaslanze auf eine Position 30 cm oberhalb der Schmelzbadoberfläche) und Start des Blasvorgangs mit einem O<sub>2</sub>-Volumenstrom von 15 m<sup>3</sup> /h bei einem Vordruck von 3,0 bar
- Zugabe von 1,5 kg ungelöschtem Kalk für die Schlackenbildung (die Ausmauerung des Konverters besteht aus Chromoxid- haltigen Steinen mit Tonerdeanteilen; daher war eine saure Schlackenfahrweise notwendig)
- Sauerstoffaufblasen mit einem O<sub>2</sub>-Volumenstrom von 30 m<sup>3</sup>/h bei einem Vordruck von 3,5 bar
- Zugabe von 1,5 kg FeSi zur Erhöhung der Belastung des zu testenden Lanzenkopfmaterials
- Hochziehen der Lanze aus dem Konverter
- Abgießen von Schlacke und Schmelze in ein Sandbett


Die untersuchten Lanzenköpfe waren aus unterschiedlichen Keramiken gefertigt. Sie wurden ohne Wasserkühlung und nur unter dem Schutz von Gas (N<sub>2</sub>) eingesetzt. Dazu verfügten die Lanzenköpfe über verschiedene Bohrungen, durch die das Schutzgas austreten kann, sodass

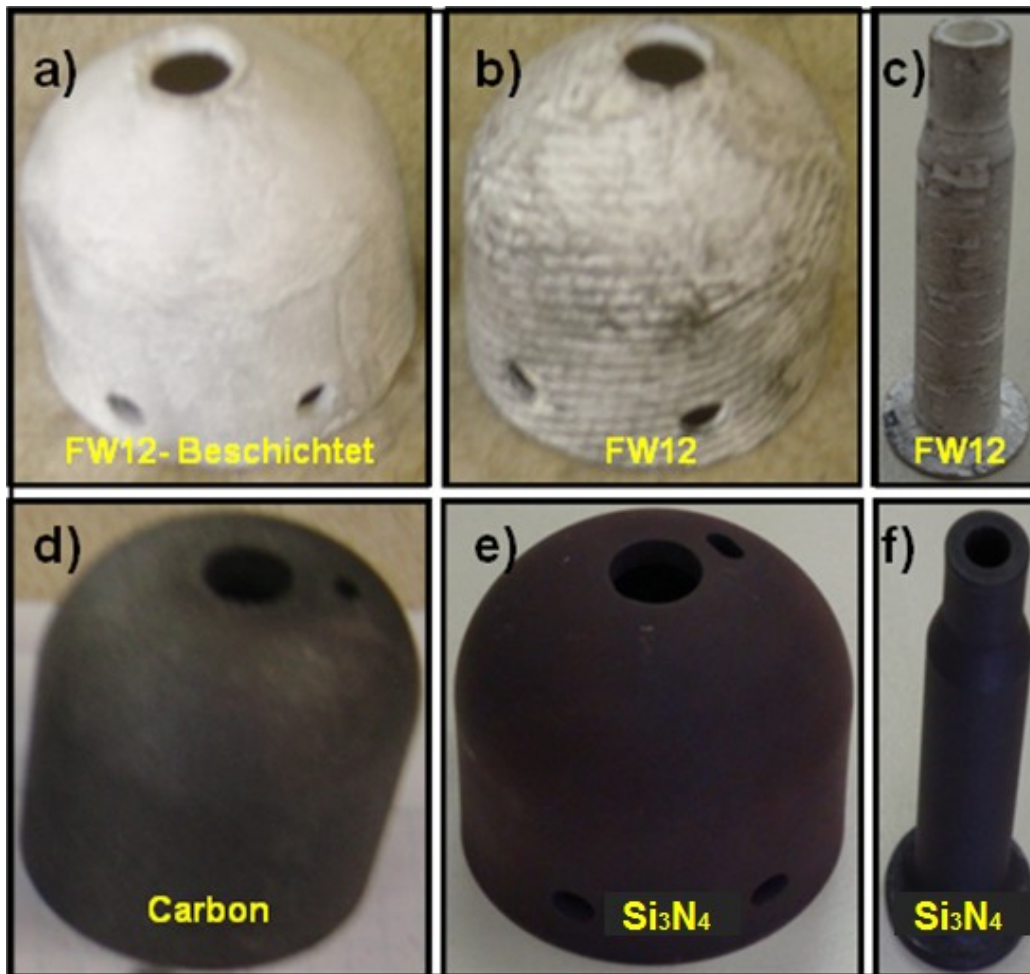
<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik Montanauniversität A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH) Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	--

der Lanzenkopf mit einem Gasschleier überzogen wird. Der eingestellte Volumenstrom des Schutzgases betrug dabei 10 m<sup>3</sup>/h.

In der Abb. 93 ist eine Übersicht der untersuchten Keramikteile gegeben. Um möglichst viele Materialvarianten zu testen wurden Köpfe aus FW12, Elektrodenkohlenstoff (Carbon) und Siliziumnitrid gefertigt. Die Köpfe aus FW12 wurden in zwei Varianten – mit Matrixmaterial beschichtet (gleicher Ausdehnungskoeffizient) (Abb. 93.a) und unbeschichtet (Abb. 93.b) hergestellt. Die Köpfe aus FW12 hatten eine Wandstärke von etwa 2 mm (beschichtet) bzw. 1 mm (unbeschichtet). Die Köpfe aus Carbon (Abb. 93.d) und aus Siliziumnitrid (Abb. 93.e) wiesen eine Wandstärke von 5 mm auf. Die Düsen wurden aus FW12 (immer unbeschichtet) (Abb. 93.c) und aus Siliziumnitrid (Abb. 93.f) gefertigt. Ihre Wandstärke betrug 1 mm.

Insgesamt wurden vier Versuche unter Variation der Lanzenköpfe und Düsen geplant. Aufgrund von Problemen mit der Sauerstoffzuführung konnten jedoch nur drei Lanzenköpfe getestet werden. Dabei wurde zuerst die Variation: Kopf aus FW12 (beschichtet) mit einer Düse aus FW12 getestet (siehe Versuch 1). Beim zweiten Versuch wurde die Variation: Kopf aus Carbon und Düse aus FW12 gewählt. Während dieses Tests fiel der Sauerstoff aus und der Versuch musste abgebrochen werden. Da der Carbon-Kopf dabei nicht beschädigt wurde, konnte er bei dem dritten Test erneut eingesetzt werden. Nun wurde eine Düse aus Siliziumnitrid (S<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) eingesetzt. Beim vierten Test wurde die Variation: Kopf und Düse aus FW12 (unbeschichtet) verwendet.

<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik Montanauniversität A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH) Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	--



**Abb. 93:** Übersicht der untersuchten keramischen Lanzenköpfe und Lavaldüsen vor dem Einsatz.

Vor Versuchsbeginn wurden die Lanzenköpfe und die unteren Teile der Lanze mit hexagonalem Bornitrid beschichtet, Abb. 94. Dies sollte die Verbärung der Teile verringern. Weiterem diente das Bornitrid als Indikator für die auftretenden Temperaturen. Bereiche, bei denen das Bornitrid verschwunden (oxidiert) ist, müssen Temperaturen von mindestens 850 °C ausgesetzt gewesen sein. Bereiche, bei denen das Bornitrid nach dem Versuch noch vorhanden ist, waren niedrigeren Temperaturen ausgesetzt. Weitere Temperaturmessungen (innerhalb der Lanzenköpfe) wurden mit Hilfe von Thermoelementen des Typs K (NiCr-NiAl) entsprechend DIN EN 60584 von TC Direkt durchgeführt. Die Thermoelemente wurden nicht über Ausgleichsleitungen, sondern direkt mit dem Messgerät verbunden. Von jedem Versuch wurden Proben der Schmelze und Schlacke genommen und auf die chemische Zusammensetzung analysiert.



In der Abb. 94 ist der schematische Aufbau des Lanzenkopfes dargestellt.

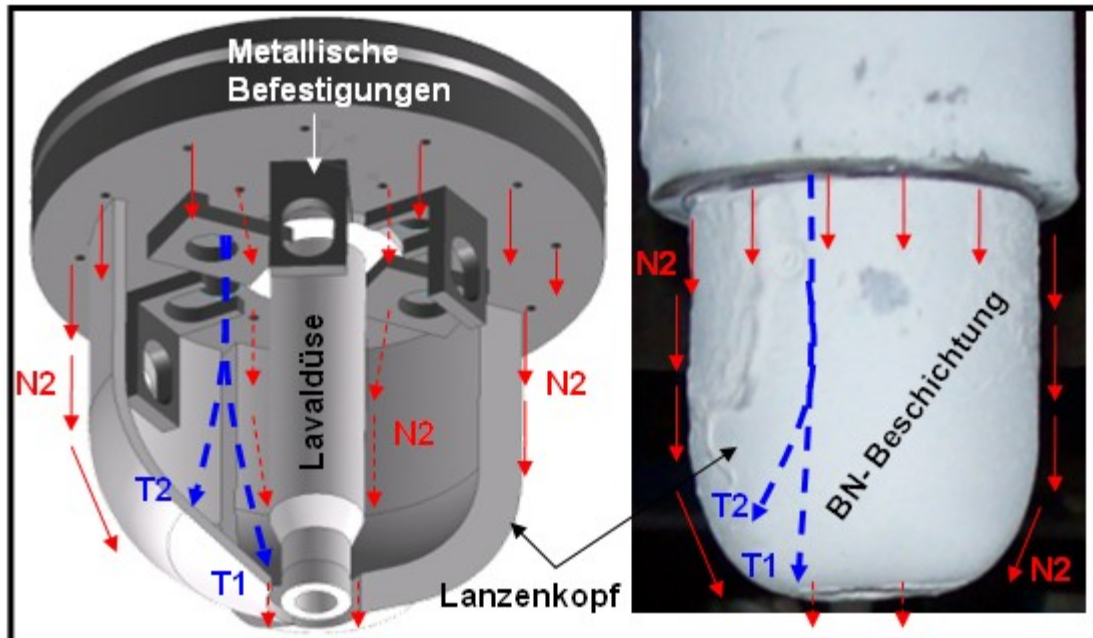


Abb. 94: Schematischer Aufbau des Lanzenkopfes und Einbausituation der Thermoelemente vor dem Versuch.

### Versuch 1 am 12.08.2008:

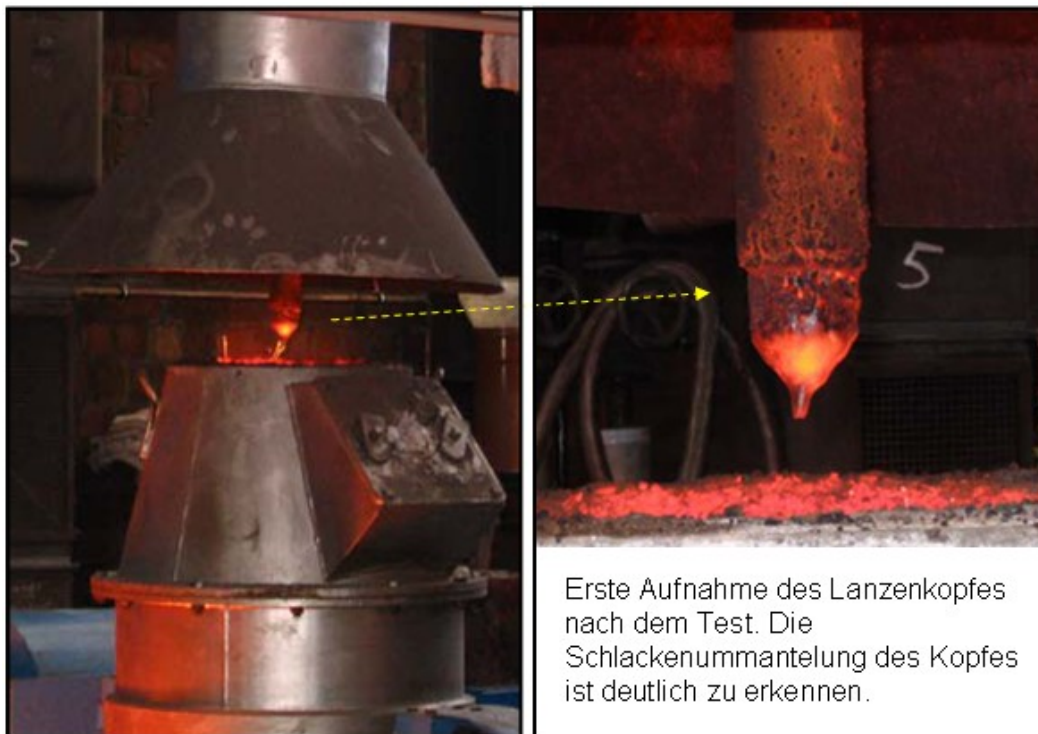
Bei dem ersten Versuch wurden der Lanzenkopf aus FW12 (beschichtet) und die Düsen aus FW12 (unbeschichtet) eingesetzt. Die Blasdauer betrug 10 Minuten und 45 Sekunden. Das entspricht der optimalen Blasdauer für die Kapazität des Konverters. Die Beurteilung der Schlacken und Abgasentwicklung während des Versuches ließ auf einen guten Blasverlauf schließen. Die Entwicklung von dichtem „braunen Rauch“ (Emulsion der Abgaskomponenten CO, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> (durch Schutzgas aus dem Konverterboden), teilweise gasförmiges FeO und MnO und eisenoxidhaltiger LD- Staub) zeigt einen hohen Entkohlungsgrad und starke Hitzeentwicklung im Brennfleck an. Das durch die aufsteigenden CO- Blasen verursachte Aufschäumen der Schlacke war während des Blasverlaufs bis zum Konvertermund sichtbar. Zu Testende war der gesamte Lanzenkopf vom Schlackenschaum eingeschlossen, siehe Abb. 95:






**Abb. 95:** „Brauner Rauch“ und Teile des Brennflecks während des ersten Versuchs.

Nach dem Test war der Lanzenkopf intakt und vollständig von einer Schicht aus erstarrter Schlacke bedeckt. Es waren keine sichtbaren Schäden zu erkennen, siehe Abb.96.



**Abb. 96:** Der mit der Schlacke ummantelter Lanzenkopf nach erstem Versuch.



<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik Montanauniversität A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH) Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	--

Danach wurden die Teile ausgebaut und visuell inspiziert. Auch dabei konnten keine Schäden (z.B. Risse) an den Teilen festgestellt werden. So waren z.B. an der Kante der Düse keine Materialabplatzungen zu erkennen und es waren an keiner Stelle der Lavaldüse oder des Kopfes offen liegende Faserbündel sichtbar. An den Oberflächen der Düsen Spitzen war aber eine Verfärbung zu sehen, die vermutlich durch Verzunderung des Kopfes (Temperaturen) oder durch seine Verschmutzung durch die austretenden Gase zu erklären ist. Auch die BN-Beschichtung war noch an allen Teilen (metallische Befestigung, Düse und Kopf innen und teilweise auch unter der Schlacke außen) vorhanden. In Abb.97 sind die Teile nach dem Versuch abgebildet.

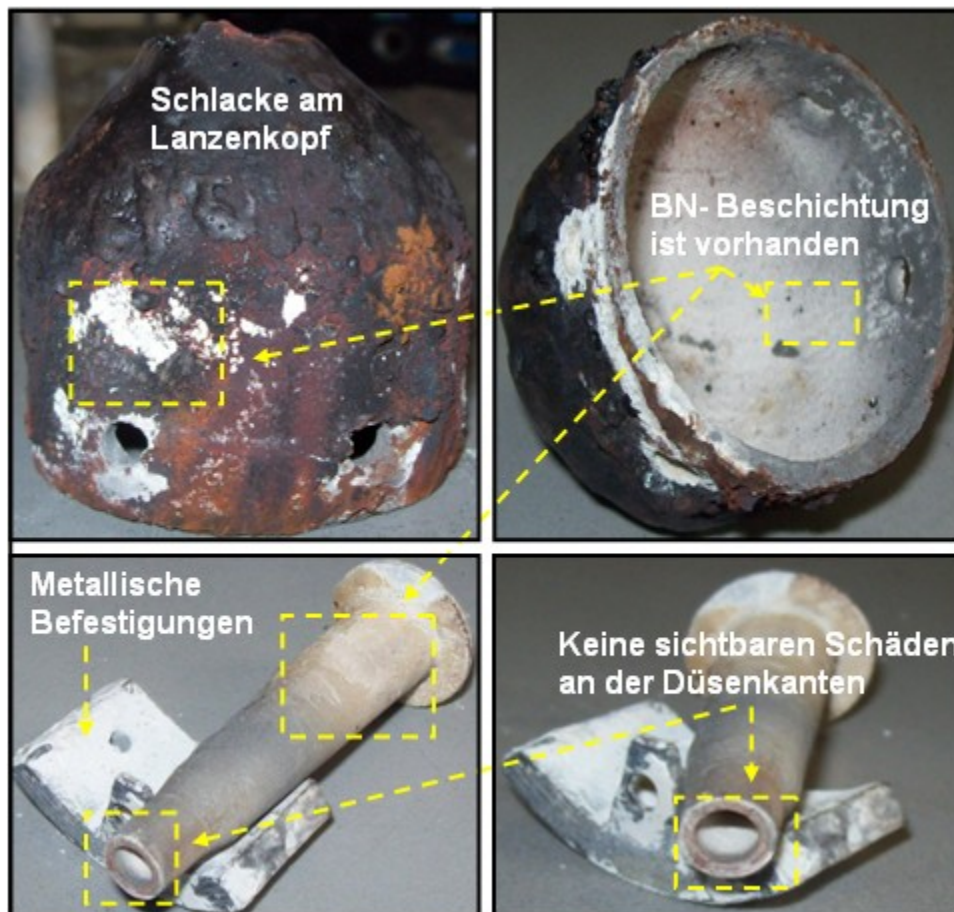
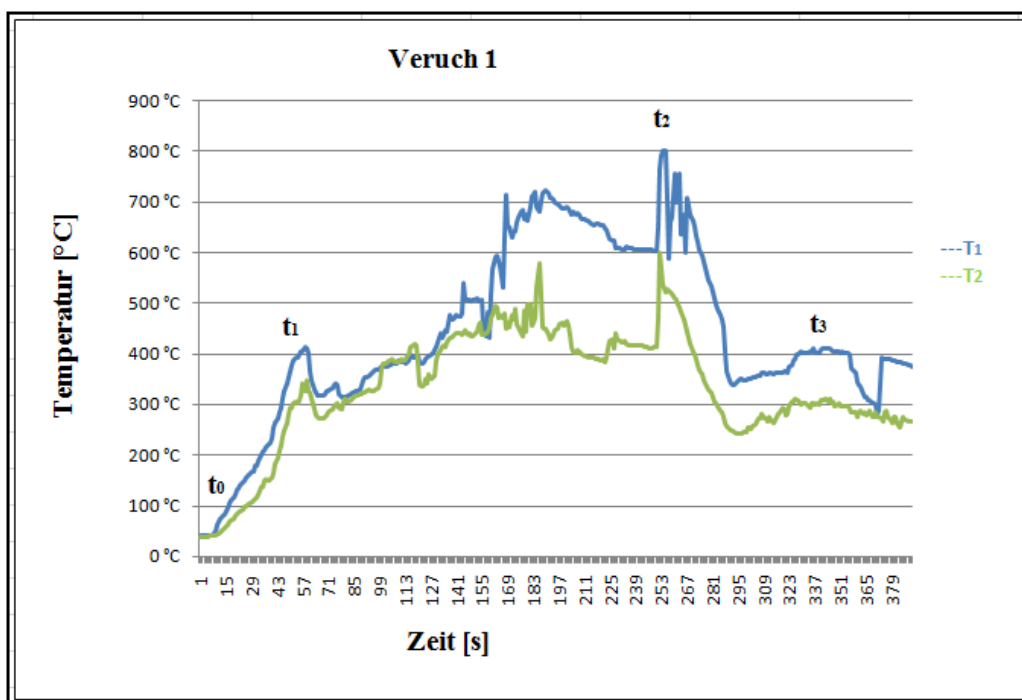


Abb. 97: Der mit der Schlacke ummantelter Lanzenkopf und Düse nach dem ersten Versuch.

Die Temperaturen während des Versuchs wurden an zwei Stellen im Innenbereich des Lanzenkopfes aufgezeichnet ( $T_1$  und  $T_2$ ). Das Entstehen flüssiger Schaumslagde deutet auf Temperaturen im Konverter von etwa 1600 - 1700°C hin. Der charakteristische „braune Rauch“ zeigt die teilweise Verdampfung von FeO und MnO im Brennfleck an. Dies deutet auf Temperaturen im Brennfleck von mehr als 2000 °C hin. Wie aus den Aufzeichnungen in




Abb. 98 zu erkennen betrug während des Blasprozesses die maximale vom Thermoelement  $T_1$  gemessene Temperatur im Lanzenkopf im Zeitpunkt  $t_2$   $800\text{ }^\circ\text{C}$ . Der maximal gemessene Temperaturwert im Thermoelement  $T_2$  wurde in dem gleichen Zeitpunkt gemessen und war etwa  $600\text{ }^\circ\text{C}$ . Der Verlauf der Kurven an den Messpositionen  $T_1$  und  $T_2$  ist annähernd synchron. Die Temperatur an der Messstelle  $T_1$  ist im Mittel etwa  $50$  bis  $100\text{ }^\circ\text{C}$  höher als an  $T_2$ , da aufgrund der Messposition im Ringspalt die Abschirmung durch den Lanzenkopf fehlt und das Thermoelement  $T_1$  dem Temperatureinfluss aus der Umgebung stärker ausgesetzt ist.



**Abb. 98:** Der Temperaturverlauf an der Innenseite des Lanzenkopfes während des Versuchs 1.

Die in Abb. 98 dargestellten Temperaturkurven zeigen den erwarteten Verlauf. Zu Beginn des Blasvorgangs (von  $t_0$  bis  $t_1$ ) stieg die Temperatur der Keramik an der Innenseite des Kopfes aufgrund des Temperaturanstiegs in der Metallschmelze stark an. Im Zeitpunkt  $t_1$  wurde Kalk chargiert, was zur Verringerung der Temperaturen im Konverter geführt hat. Der weitere Temperaturanstieg an der Innenseite des Kopfes (bis zum Zeitpunkt  $t_2$ ) ist typisch für die Temperaturentwicklung im LD- Prozess. Zum Zeitpunkt  $t_2$  erfolgte die Chargierung von FeSi in den Reaktionsraum. Dies führte zur exothermen Reaktionen im Konverter und dadurch einen rasanten Temperaturanstieg. Hier wurden auch die höchsten Temperaturen ( $800\text{ }^\circ\text{C}$ ) gemessen. Zum Ende des Prozesses ( $t_3$ ) wurde der Kopf durch den nach der Chargierung noch heißen Konverter noch weiter aufgeheizt.

In den am Beginn des Kapitels dargestellten Modellrechnungen wurde gezeigt, dass aufgrund der Kühlung durch das Schutzgas die Temperaturen an der Außenseite des Kopfes nicht

<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik Montanauniversität A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH) Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	---

erreicht werden. Einer Innentemperatur von 800°C entspricht eine Außentemperatur von circa 1100 °C (bei einer Schutzgastemperatur von 20 °C) bis zu etwa 1200°C (bei einer Schutzgastemperaatur von 300 °C). Zu den geringen Temperaturen auf der Innenseite des Kopfes hat sicherlich auch die Schlackenschale beigetragen, welche die Wärmeleitung von außen nach innen zusätzlich verzögert. Da die Wärmeleitfähigkeit und der Emissionskoeffizient dieser Schlackenschicht sehr schwer zu ermitteln sind, wurden sie in dieser Berechnung nicht mitberücksichtigt. Die Temperaturen an der Außenseite der Schlackenschicht könnten somit auch etwa 1300- 1400°C betragen haben.

Die chemische Analyse der Schlackeproben von Versuch 1 zeigt Tabelle 2.

Element	Fe	Mn	Si	Ca	P
Gew.-%	17,3	1,63	20,3	6,78	0,10

**Table 2.** Analyse der Schlackeproben (gemittelte Zusammensetzung in Gewichtsprozent) von Versuch 1.

Insgesamt ist der Versuch sehr positiv verlaufen. Die deutliche Entwicklung von „braunem Rauch“ und das starke Schäumen der Schlacke zeigen eine gute Sauerstoffzufuhr und hohe Reaktionsraten sowie Hitzeentwicklung im Konverter an. Die Temperaturmessungen machten die hohe Wärmeschutzwirkung des N<sub>2</sub>- Schutzgasschleiers plausibel. Offensichtlich hat das hier eingesetzte Schutzgas nicht nur die Oberflächen des Kopfes gekühlt, sondern auch die Schlackenpartikel, die mit dem Lanzenkopf in Kontakt kamen. Dadurch konnten die gekühlten Schlackenpartikel chemisch nicht mit der Keramik reagieren. Die Zusammensetzung der Schlacke entspricht der sauren Schlackenfahrweise etwa zur Mitte des Blasprozesses. Das am Ende des Versuches hinzugefügte FeSi führte zu einer starken Siliziumoxidation (sichtbar anhand hoher SiO<sub>2</sub> Anteile in der Schlacke). Dies bedeutet, dass auch bei Versuchende eine hinreichende Sauerstoffzufuhr vorhanden war, bzw. dass ein richtiger LD-Prozess durchgeführt wurde, der (abgesehen von der Stahlmenge) dem in einem größeren Konverter durchgeführten LD- Prozess gleichgesetzt werden kann. Mit diesen Versuchen konnten wichtige Daten über Temperaturen im Lanzenkopf und über die Zusammensetzung der Schlacke und deren Auswirkungen auf die Keramikteile beim LD- Prozesses gewonnen werden.

Dieser Testverlauf war somit erfolgreich. FW12 scheint als Werkstoff für die Düsen – auch in größeren Aggregaten – grundsätzlich geeignet zu sein.



### Versuch 2 am 13.08.2008:

Beim zweitem Versuch wurde die Variation: Kopf aus Carbon und Düse aus FW12 geprüft. Die Blasdauer betrug 3 Minuten und 40 Sekunden. Die Beurteilung des Versuchsverlaufs anhand der visuellen Beobachtung der Abgas- und Schaum Schlackenentwicklung zeigt eine unzureichende Sauerstoffzufuhr an. Erkennbar ist dies an einer nur schwach ausgeprägten Abgasentwicklung sowie nicht sichtbarem Schlackeschäumen. Der Versuch wurde nach 3 Minuten und 40 Sekunden aufgrund eines Bruchs der Sauerstoffzuführung (Störung im Versorgungsschlauch) abgebrochen. Die Ergebnisse der Thermoelementmessungen an der Innenseite des Lanzenkopfes sind in Abb. 99 dargestellt. Deutlich erkennbar sind niedrigere Temperaturen (maximal 250 °C) im Vergleich zu Versuch 1. Wie auch beim ersten Versuch sind am Verlauf der Temperaturmesskurven ( $T_1$ ,  $T_2$ ) zum Zeitpunkt  $t_1$  (Chargierung des Kalks) ein Temperaturabfall und zum Zeitpunkt  $t_2$  (Chargierung von FeSi) ein Temperaturanstieg zu erkennen. Bei anderen Versuchen wurde erkannt, dass der Sauerstoffschlauch geknickt war. Dies war vermutlich die Ursache für den Bruch des Schlauchs in diesem Versuch. Vermutlich ist die sehr niedrige Temperaturentwicklung in diesem Versuch auf die ungenügende Versorgung mit Sauerstoff zurückzuführen.

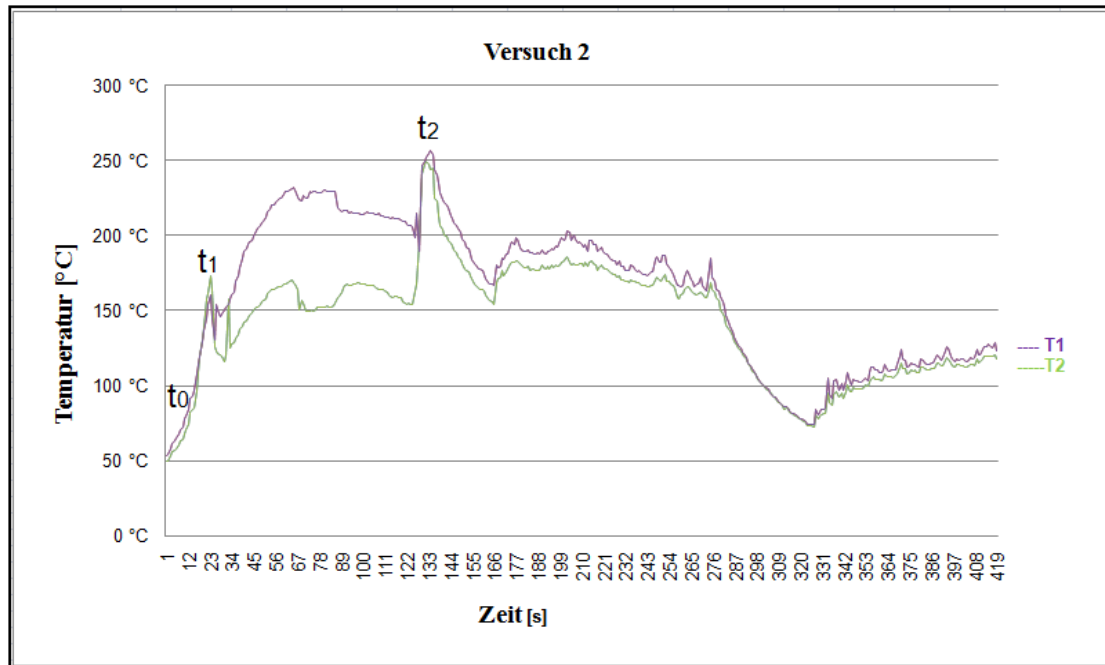

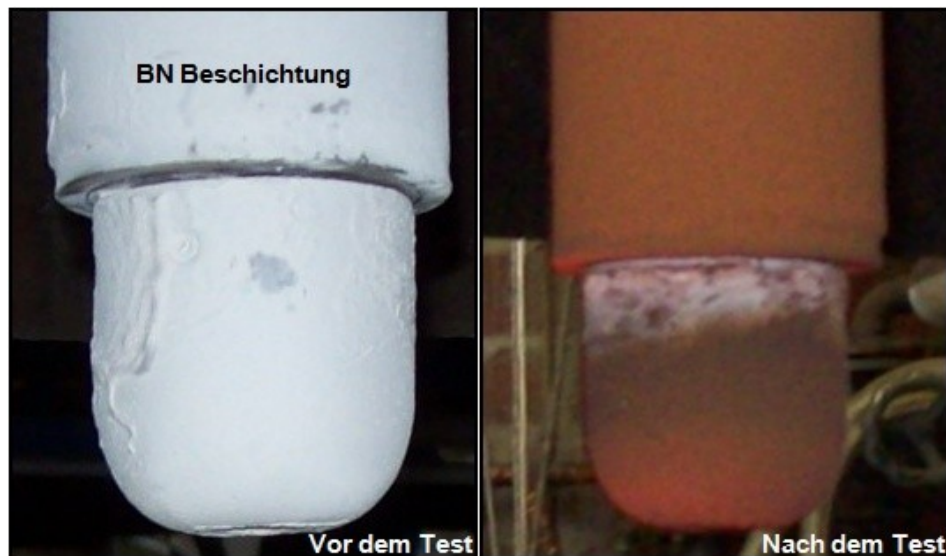


Abb. 99: Der Temperaturverlauf während des Versuchs 2.

Da der Karbonkopf bei dem Test nicht beschädigt wurde, siehe Abb. 100, konnte er bei dem dritten Test erneut eingesetzt werden.

<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik Montanauniversität A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH) Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	--



**Abb. 100:** Lanzenköpfe vor und nach dem zweiten Versuch.

Die visuelle Beobachtung des Versuchsverlaufs zeigte eine schwache Abgasentwicklung und keine Schaum Schlacke. Die Temperaturmessung in der \*Lanzenspitze ergab niedrige Temperaturen während des Blasversuchs. Die Schlackenanalyse zeigt relativ zu dem  $\text{SiO}_2$  Anteil einen zu hohen  $\text{CaO}$  Gehalt. Beim Abgießen zeigte sich eine nur geringe Schlackenmenge mit teilweise ungelöstem  $\text{CaO}$ . Die Oxidation des im  $\text{FeSi}$  enthaltenen Siliziums erfolgte nicht oder nur zu einem geringen Anteil. Auch all diese Beobachtungen zeigen eine unzureichende Sauerstoffzufuhr an.

### **Versuch 3 am 14.08.2008:**

Beim dritten Versuch wurden wiederum der Karbonkopf und die Düse aus Siliziumnitrid eingesetzt. Die Blasdauer betrug 4 Minuten und 2 Sekunden. Die visuelle Beobachtung des Blasversuchs zeigt ein hohes Aufkommen an „braunem Rauch“ sowie eine deutliche Entwicklung von Schaum Schlacke bis zum Konvertermund. Wie bereits erläutert (Versuch 1), bedeutet dies eine hohe Entkohlung und Temperaturen von mehr als  $2000\text{ °C}$  im Brennfleck. Aufgrund des abrupten Abfalls der Abgas- und Schlackenentwicklung während der vierten Blasminute ( $t_3$ ) wurden  $1,5\text{ kg FeSi}$  chargiert und nach kurzer Zeit wurde der Konverter abgegossen. Dabei zeigte sich, dass der Lanzenkopf und die Sauerstoffdüse von der Lanze abgefallen waren. Nach dem Abguss konnte der unbeschädigte Lanzenkopf aus dem Sandbett gehoben werden. Die Temperaturmessungen im Lanzenkopf ( $T_1$  und  $T_2$ ) zeigten bis zum Zeitpunkt des Abfallens des Lanzenkopfes ( $t_4$ ) einen zu Versuch 1 ähnlichen Verlauf ( $t_0$ - $t_3$ ). Anschließend stiegen die Messwerte auf Temperaturen oberhalb des Messbereichs der Thermoelemente an (die Messung war kurz unterbrochen) und fielen anschließend auf das Minimum zurück.



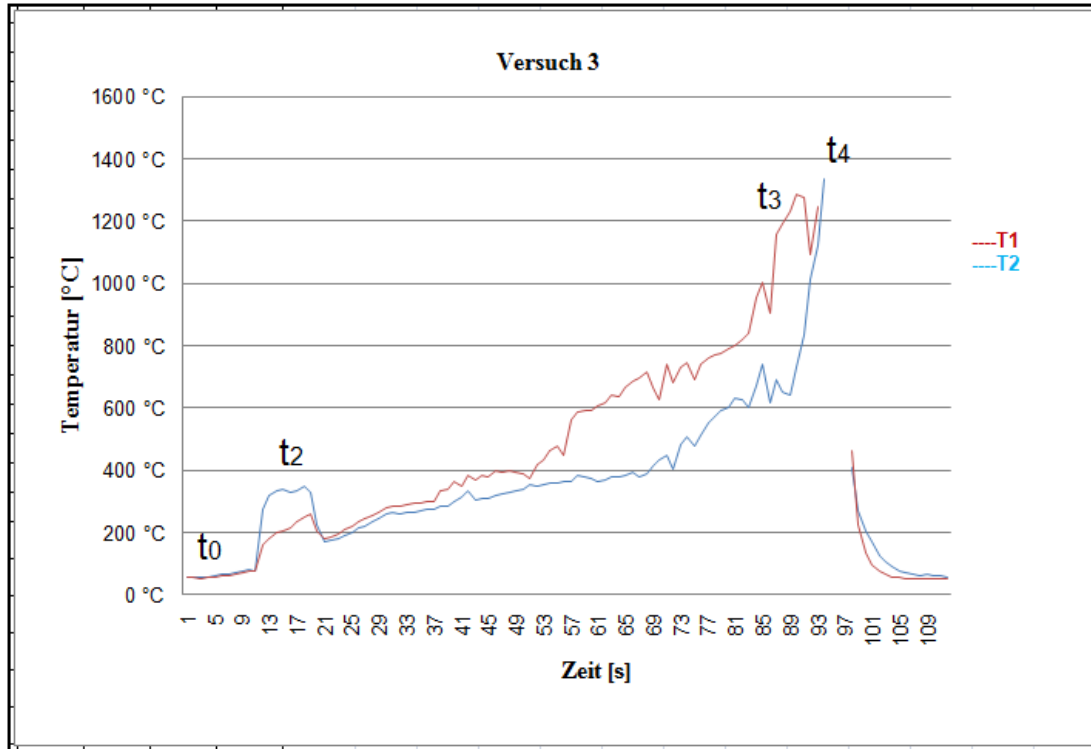

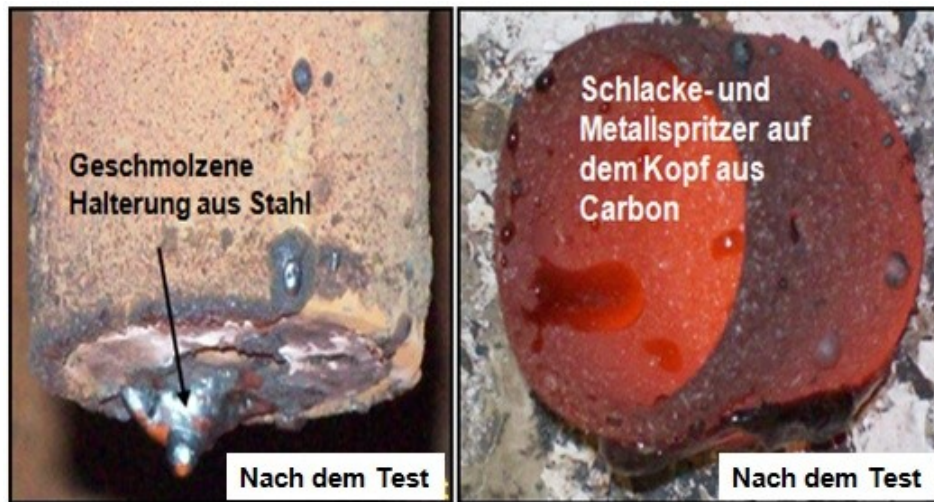


Abb. 101: Der Temperaturverlauf während des Versuchs 3.

Das Abfallen des Kopfes und der Düse während dieses Versuchs ist auf das Abbrennen der metallischen Halterungen zurückzuführen. Bereits bei der Montage der Lavaldüse aus Siliziumnitrid wurden kleine Unebenheiten am metallischen Befestigungselement festgestellt, die bewirkten, dass bei der Montage keine gute Dichtung zwischen der Düse und den Metallteilen hergestellt werden konnte. Durch die undichten Stellen könnte Sauerstoff (quer zur seiner Achse der Düse) in den Spalt zwischen der Düse und den metallischen Teilen gelangt sein. Das dürfte zur Entwicklung sehr hoher Temperaturen am metallischen Befestigungselement und letztlich zu seinem Schmelzen geführt haben, was schließlich den Verlust des Lanzenkopfes und der Düse bewirkt hat (sie sind in die metallische Schmelze gefallen). Der Lanzenkopf aus Carbon konnte im Anschluss an diesen Versuch aus dem Sandbett geborgen werden. Er zeigte keine starken Verschmutzungen mit der Metallschmelze oder mit Schlacken. Es wurden nur kleine Tropfen aus Stahl und Schlacke festgestellt (siehe Abb.102). Der Verschleiß des Kopfes betrug circa 0.5 mm der Wanddicke (ursprünglich 5 mm). Es wurden keine Risse oder andere sichtbaren Schäden am Lanzenkopf festgestellt, siehe Abb. 102.



<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik Montanauniversität A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH) Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	--




**Abb. 102:** Geschmolzene Stahlhalterung (links im Bild) und noch glühender Lanzenkopf aus Carbon (rechts im Bild) nach dem dritten Versuch. Kleine Stahl- bzw. Schlackentropfen sind am Carbonkopf zu erkennen.

Die Beurteilung des Blasverlaufs bis zu dem Zeitpunkt des Ablösens des Lanzenkopfes ist positiv. Die deutliche Entwicklung von „braunem Rauch“ und das starke Schäumen der Schlacke zeigten eine gute Sauerstoffzufuhr und hohe Reaktionsraten sowie Hitzeentwicklung im Konverter an. Die Thermoelementmessungen im Lanzenkopf (niedrige Temperaturen) machten die hohe Wärmeschutzwirkung des Lanzenkopfes durch das N<sub>2</sub>- Schutzgas deutlich. Insbesondere der hohe Temperaturanstieg nach dem Abfallen des Kopfes macht die Wirkung des Schutzgasschleiers deutlich. Die Tatsache, dass das am Ende des Versuches hinzugefügte FeSi zu einer starken Siliziumoxidation führte (sichtbar anhand hoher SiO<sub>2</sub> Anteile in der Schlacke), bedeutet, dass bei der FeSi Zugabe ein hoher Gehalt an Eisenoxiden in der Schlacke vorhanden war. Diese haben zu einer Oxidation des Siliziums geführt und wurden gleichzeitig reduziert. Erkennbar ist dies ebenfalls an der vergleichsweise niedrigen Konzentration an Eisenoxiden in der Schlacke. Ausgehend von der Reduktion des in der Schlacke enthaltenen Eisenoxids durch Silizium entspricht die Schlackenzusammensetzung der sauren Schlackenfahrweise etwa zum Ende des ersten Drittels des Blasprozesses.

#### **Versuch 4 am 15.08.2008:**

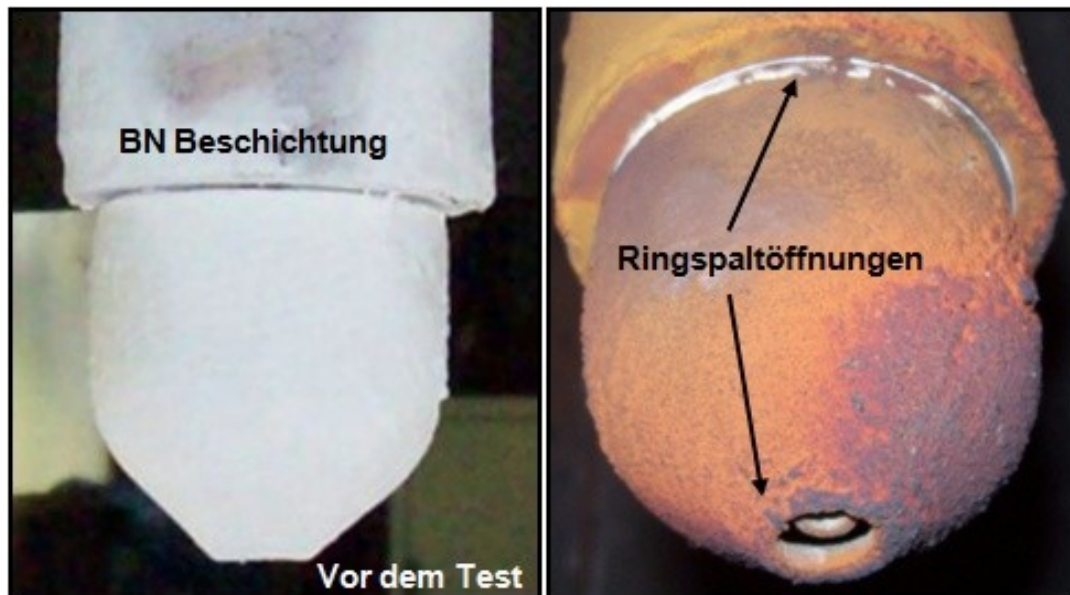
Bei dem vierten Versuch wurden der Lanzenkopf und die Düsen aus FW12 (unbeschichtet) eingesetzt. Die Blasdauer betrug 5 Minuten und 40 Sekunden. Die visuelle Beobachtung des Blasversuchs zeigte die Entstehung von „braunem Rauch“. Im Vergleich zu den Versuchen 1 und 3 wurde in Versuch 4 die Entwicklung von „braunem Rauch“ aber deutlich geringer. Das Aufschäumen der Schlacke konnte beobachtet werden, es war jedoch ebenfalls deutlich geringer als bei den Versuchen 1 und 3. Dies deutet auf eine unzureichende Sauerstoffzufuhr zur Roheisenschmelze hin. Zum Ende des Blasversuchs wurde ein Nachlassen der Sauer-

<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik Montanauniversität A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH) Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	--

stoffzufuhr beobachtet, deutlich erkennbar anhand stark verminderter Entstehung von Abgasen und Schaumslagge. Nach der Zugabe von 1,5 kg FeSi wurde der Versuch abgebrochen.


Während des Versuchs 3 wurden aufgrund des abfallen des Lanzenkopfes die Leitung für die Durchführung der Thermoelemente in der Lanze verstopft. Ursachen dafür waren wahrscheinlich hochgeschlagene Schlacke- oder Schmelzetropfen. Daher waren die Installierung von Thermoelementen bzw. die Temperaturmessungen am Lanzenkopf während des Versuch 4 nicht möglich.

Nach dem Versuch wurden die Teile ausgebaut und visuell inspiziert. Es wurden keine sichtbaren Schäden an Teilen festgestellt Abb.103:



**Abb. 103:** Lanzenköpfe vor und nach dem vierten Versuch.

Bei der Überprüfung der Sauerstoffzufuhr zur Lanze nach Beendigung des Versuchs wurde unter eingewickeltem Isolationsmaterial ein „Knick“ im Schlauch für die Sauerstoffzufuhr festgestellt, der durch das hohe Gewicht des Isolationsmaterials am Versorgungsschlauch während der Versuchsdurchführung verursacht wurde. Leider wurde er nicht frühzeitig erkannt. Dadurch war beim zweiten und vierten Versuch kein konstanter und zuverlässiger Durchfluss des Sauerstoffs gewährleistet.

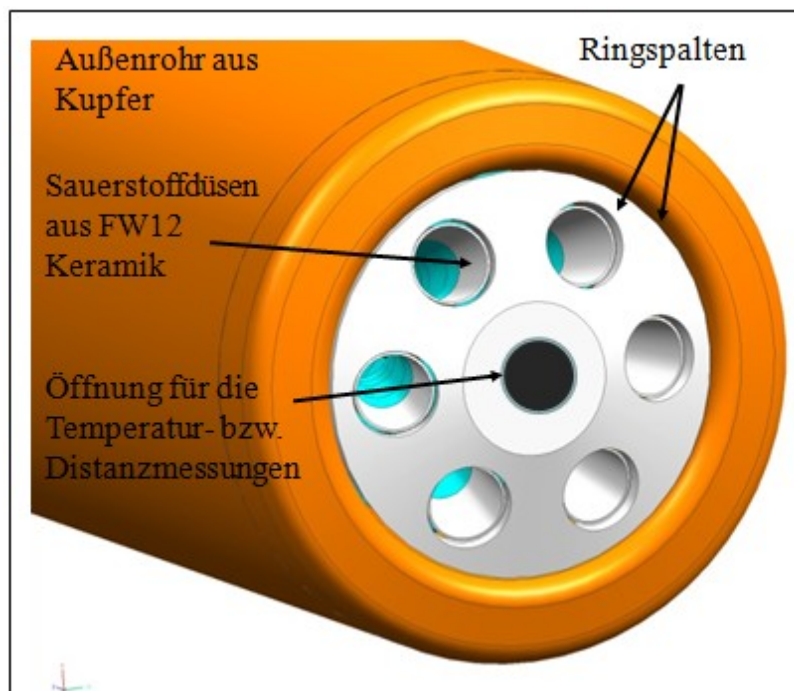
<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik Montanauniversität A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH) Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	--

Zusammenfassend ergeben die an der RWTH in Aachen durchgeführten Tests, dass ein Lanzenkopf bzw. Teile davon aus keramischen Werkstoffen und ohne Wasserkühlung für einen LD- oder AOD- Prozess möglich sind. Insbesondere sind die Ergebnisse des ersten Versuches dieser Versuchsserie für weitere industrielle Anwendungen vielversprechend. Dabei haben der neu entwickelte keramische Lanzenkopf einen kompletten LD- Prozess und damit auch die prozessbedingten Beanspruchungen in einem sehr guten Zustand überstanden. Die während der Versuche gemessenen Temperaturen im Lanzenköpfen (insbesondere beim Versuch 1) machen plausibel, dass an der Außenseite des Kopfes Temperaturen von 1300-1400°C geherrscht haben. Offensichtlich wird die Wärmestrahlung, die von der Stahlschmelze und dem Brennfleck ausgeht, durch die schäumende Schlacke und durch die am Lanzenkopf erstarrte Schlacke stark absorbiert. Damit kann, wie vom Autor vermutet, festgestellt werden, dass die Temperaturentwicklung am Lanzenkopf überwiegend durch die Konvektion mit der umgebenden Schlacke mitbestimmt wird. Der Einsatz des Schutzgases (durch das Ringspaltsystem) hat bei der Gesamtkonstruktion auch vielversprechende Vorteile gebracht. Obwohl in sehr kleinen Mengen eingesetzt, konnte das Schutzgas die Oxydation der keramischen Teile stark minimieren. Durch seine Kühlwirkung (insbesondere der umgebenden Schlacke) und des Lanzenkopfes konnten die chemischen Reaktionen zwischen der Schlacke und der Keramik stark minimiert werden. Das Einsaugen von Umgebungsmedien (Stahl und Schlacke) in die Lavaldüse wurde durch das Einblasen von Schutzgas durch den Ringspalt verhindert. Durch die Eliminierung des Kühlwassers wäre es nun möglich, Messensoren zur Prozessüberwachung und Steuerung in den Lanzenkopf zu installieren. Weitere Fragen wie z.B.: über die Lebensdauer dieser Teile und über deren Einfluss auf den metallurgischen Prozess könnten in der Folge durch Langzeittests unter Betriebsbedingungen beantwortet werden.




### 9.5 Test des Lanzenkopfes bei Arcelor Mittal Eisenhüttenstadt (AME)

Der erste Betriebstest der neuentwickelten Sauerstofflanze sollte beim Testpartner Arcelor Mittal Eisenhüttenstadt (AME) in Eisenhüttenstadt an einem 170 Tonnen Konverter durchgeführt werden. AME hat für die Testzwecke eine geeignete Lanze an Siemens VAI übergeben. Der durch SVAI geplante Umbau dieser Testlanze erfolgte, um Kosten zu sparen, direkt bei AME. Im Rahmen dieser Arbeit wurde vom Autor aufgrund ihrer Einmaligkeit und Komplexität auch die Vorgehensweise für den Test ausgearbeitet. Diese wurde dann gemeinsam mit AME diskutiert und beschlossen. Im Rahmen dieser Testkampagne wurden zur Vorbereitung, zur Schulung des einzusetzenden Personals und zur Erhöhung der Sicherheit während des Testes auch eine Konstruktions- und eine Test- FMEA (Fehler-Möglichkeiten- Eintritts - Analyse) gemeinsam mit AME durchgeführt. Ergebnisse dieser Analysen zeigten, dass die möglichen Risiken für Versagen und Gefährdung vertretbar sind. Die Konstruktion der neuentwickelten Lanze bzw. des Lanzenkopfes wurden dabei detailliert analysiert und ohne Änderungen vom Kunden akzeptiert, Abb.104.



**Abb. 104:** Die neue Konstruktion des zu testenden Lanzenkopfes bei AME als 3D- Modell.

<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik Montanauniversität A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH) Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	--

### 9.5.1 Ziele der Testkampagne:

Der erste Test der neuen Sauerstoffflanze unter realen Bedingungen bzw. während eines LD-Prozesses bei (AME) wurde als Ziel der geplanten Versuchsreihe bei AME festgelegt. Dabei sollten folgende Punkte beobachtet bzw. evaluiert werden:


- Kontinuierliche Temperaturmessungen in den metallischen Teilen, keramischen Platten und den Lavaldüsen
- Lebensdauer der keramischen Teile
- Art und Ausmaß der Schäden an den keramischen Teilen
- Schutzwirkung (inerte Umgebung) durch eingesetztes Schutzgas auf alle Teile des Lanzenkopfs (insbesondere auf die Schutzplatte aus Carbon)
- Kühlwirkung des eingesetzten Schutzgases auf alle Teile des Lanzenkopfs (insbesondere auf die Düsen spitzen und die keramischen Platten)
- Intensität der Verschlackung bzw. Verbärung des Lanzenkopfes bzw. der Außenseite des Lanzenrohres
- Einfluss des eingesetzten Schutzgases auf metallurgische Prozessparameter in der Stahlschmelze (Entkohlung, Aufstickung... etc.)
- Distanzmessung des Lanzenkopfes vom Metallbad
- Mögliche Vorteile bei der Montage und Instandsetzung des Lanzenkopfes

Folgende Voraussetzungen mussten erfüllt werden:

- Normalbetrieb des Konverters nach AME- Programm
- Normalbetrieb der Sauerstoffflanze nach AME- Programm
- die Anschlüsse der Sauerstoffflanze an die Wasserkühlung und die Sauerstoffversorgung mussten unverändert bleiben
- die Anbindung der Lanze an weitere Medien (Argon, Stickstoff, Druckluft) muss gewährleistet werden (AME)

Um den laufenden Konverterbetrieb so wenig wie möglich zu beeinflussen wurde folgende Vorgehensweise beschlossen:



<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik Montanauniversität A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH) Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	--

- Durchführung einer gemeinsamen FMEA bezüglich der konstruktiven Ausführung (Lanze, Lanzenkopf) und des Testablaufes
- Schulung und Sensibilisierung der Mitarbeiter (SVAI)
- Optimierung der Mengen und des Durchflusses der Zusatzmedien vor dem Test (im ersten Versuch soll nur Argon zum Einsatz kommen; notwendige Gasversorgung: 10-20 m<sup>3</sup>/min bei einem Druck von ca. 1 bar).
- Ständige Überwachung des gesamten Prozesses anhand von Temperaturmessungen im Lanzenkopf durch zusätzlich angebrachte Thermoelemente

Es waren eine bis zwei Wochen für die Montage der Lanze und die Durchführung der Tests vorgesehen (der normale Konverterprozess durfte während dieser Zeit nicht beeinflusst werden). Ca. 1-10 Chargen wären für aussagekräftige Resultate notwendig (Phase 1). Falls Verbesserungen bzw. Anpassungen nötig sind, wurde folgende Vorgehensweise angedacht:

- Je nach Aufwand sollten bis zu vier Wochen Timeout für etwaige Anpassungen bzw. Verbesserungen (der normale Konverterprozess darf während dieser Zeit nicht beeinflusst sein) eingeplant werden. Zur Fortsetzung der Versuche sollten jedoch diverse Montageelemente Vorort belassen werden.
- Darauf sollte eine weitere Testserie mit wiederum ca. 10 - 50 Chargen (Phase 2) erfolgen


Die Testphase 2 sollte auch für die Einbindung diverser Messinstrumente genutzt werden. Diese sollen über einen Zentralkanal der Lanze bis zum Lanzenkopf geführt werden. Folgende Messungen sind vorab vorgesehen: Temperatur des Brennflecks „insitu“, online Distanzmessung, etc.

### 9.5.2 Festgelegte Test- bzw. Messprozedur

Nach Freigabe durch den Operator sollte der Test wie folgt durchgeführt werden:

- Check der Messinstrumente (Stellung über Lanzentrichter)
- Lanze fährt in den Konverter (Zusatzmedien: Schutzgas sind „ON“)
- Lanze wird positioniert O<sub>2</sub>- Ventil wird geöffnet



<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik Montanauniversität A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH) Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	--


- Beginn des Frischprozesses
- Blasunterbrechung wegen Probeentnahme, Lanze fährt zurück aus dem Konverter (Druckluft/Schutzgas sind „ON“, gleichzeitig visuelle Überprüfung des Lanzenkopfes)
- Je nach Bedarf bzw. je nach Zustand der Blaselanze wird Sauerstoff nachgeblasen bzw. der Prozess fortgesetzt
- Lanze fährt in den Konverter (Zusatzmedien: Schutzgas sind „ON“)
- Beginn des Nachblasprozesses
- Ende des Frischprozesses
- Der Operator des Konverters fährt die Lanze wieder zurück in die Stellung über dem Lanzenrichter
- Abnahme des Ist- Zustandes der Lanze durch das Testteam und Vergleich mit Soll-Zustand
- Die Lanze wird abmontiert

Während des gesamten Frischprozesses sollte ein Normalbetrieb des Konverters und der Lanze nach AME Programm durchgeführt werden. Bei Störungen (Wasserdurchbruch, Beschädigung des Lanzenkopfes, Anstieg der Temperaturen...) sollte das Notprogramm der AME durchgeführt werden, d.h. die Lanze wird sofort aus dem Konverter herausgefahren.

Die Anzahl der weiteren Testchargen (ca. 1-10 Chargen) sowie alle anderen Abweichungen vom AME- Normalbetrieb sollten noch im Detail von beiden Partnern festgelegt werden. Die Versuche sollten mittels Videokamera aufgenommen und dokumentiert werden.

### **9.5.3 Voraussichtlicher Einfluss des Einsatzes des neuen Lanzenkopfes auf den BOF Prozess:**

- Das Zusatzmedium Argon (Schutzgas) hat keinen metallurgischen Einfluss auf die Stahlqualität.
- Die Verwendung von Druckluft bzw. Stickstoff als alternatives Medium zum teuren Argon kann unter Umständen Beeinfluss die Stahlqualität haben. Dieser Aspekt, sollte bei weiteren Tests untersucht werden.

<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik Montanauniversität A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH) Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	--

#### 9.5.4 Ergebnisse der Versuche bei AME

Durch das Ausscheiden des Autors aus dem Unternehmen Siemens VAI war es ihm nicht möglich, an den durchgeführten Versuchen bei AME teilzunehmen. Aufgrund einer Vereinbarung zwischen dem Autor und Siemens VAI wurde dem Autor seitens Siemens VAI aber gestattet, einzelne Projektdaten bzw. Informationen, die wichtig für die Anfertigung dieser Arbeit sind, zu nutzen. Im Gegenzug verpflichtete sich der Autor, die hier vorliegende Arbeit auf eine Zeit von 5 Jahren sperren zu lassen. Im Rahmen einer gemeinsamen Besprechung zwischen Siemens VAI und dem Autor wurden die Ergebnisse der Versuche bei AME und die weiteren Schritte diskutiert. Dabei wurden dem Autor die Versuchsergebnisse leider nur mündlich mitgeteilt und nur zwei Bilder mit Versuchsergebnissen zur Verfügung gestellt. Die neue Sauerstofflanze wurde nicht, wie ursprünglich geplant und mit Kunden (AME) vereinbart während eines LD- Prozesses sondern in zwei anderen kurzfristig geplanten Versuchen getestet.

- Beim ersten Versuch wurde die Sauerstofflanze als „Vorwärmelanze“ zum Vorwärmen eines neu-zugestellten LD- Konverter eingesetzt.
- Beim zweiten Versuch wurde die Sauerstofflanze als „slag splashing“ Lanze zum Aufblasen der Schlacke im LD- Konverter eingesetzt.

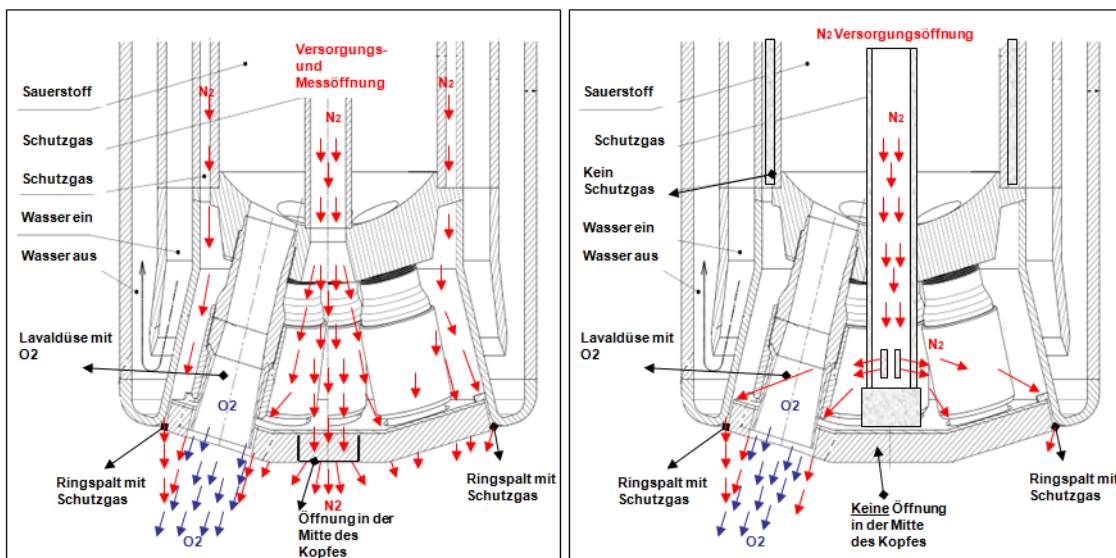
Bei den durchgeführten Versuchen sind die Prozess- bzw. Umgebungsbedingungen vollkommen unterschiedlich zu denen in einem LD- Prozess. Daher treten auch andere Beanspruchungen als beim LD-Prozess auf. Diese wurden bei der Konstruktion des neuen Lanzenkopfes und der neuen Lavaldüse nicht berücksichtigt. Daher ist eine direkte Übertragung der Ergebnisse der Analysen der aufgetretenen Schäden an Teilen des Lanzenkopfs (z.B. bezüglich der Haltbarkeit der Teile) auf einen LD- Prozess nicht möglich. Von Siemens VAI wurde beschlossen, keine weiteren Untersuchungen an den getesteten Teilen durchzuführen.

In den folgenden Analysen wird versucht, möglichst viele Informationen aus den Ergebnissen der Versuche bei AME zu gewinnen, um diese für einen eventuellen späteren Test des Lanzenkopfes in einem LD- Prozess zu verwenden. Daher werden, die dem Autor zur Verfügung gestellten Daten makroskopisch analysiert und diskutiert.

An beiden getesteten Sauerstofflanzen wurden seitens Siemens VAI kurz vor Beginn der Tests einige konstruktive Änderungen vorgenommen. Als erste wesentliche Änderung ist die Eliminierung der Schutzgasversorgung der Lanzenkopfteile im Bereich zwischen dem Sauerstoffrohr und der Wasserkühlung anzusehen, Abb.105. Die Versorgung mit Schutzgas erfolgt stattdessen nur durch ein in der Mitte des Sauerstoffrohrs eingeführtes Rohr




(Durchmesser 10 mm). Durch dieses Rohr wurde auch ein Thermoelement zur Temperaturmessung durchgeführt, das an der metallischen Befestigungsplatte montiert wurde. Die Befestigung der Isolations- und Schutzplatten erfolgte nur durch eine metallische Schraube in der Mitte (im Stirnbereich) des Lanzenkopfes. Dadurch wurde die Öffnung, die ursprünglich für den Austritt des Schutzgases (bzw. für die Distanzmessung) im Stirnbereich des Kopfes vorgesehen war, geschlossen und die Distanzmessungen bzw. Austritt des Schutzgases in diesem Bereich unmöglich gemacht. Die wesentlichen Änderungen am neuen Lanzenkopf sind im direkten Vergleich zur ursprünglichen Konstruktion in der Abb.105 gezeigt:



**Abb. 105:** Die Ursprüngliche (links im Bild)- und die geänderte Konstruktion des Lanzenkopfes (rechts im Bild). Der große Spalt für die Zuführung des Schutzgases zwischen dem Sauerstoffrohr und der Wasserkühlung wurde geschlossen und die Versorgung mit Schutzgas ausschließlich durch das in der Mitte eingelegte Rohr vorgesehen. Durch Einbringen einer metallischen Schraube in der Mitte (Stirnbereich) des Kopfes wurde diese Öffnung für den Austritt des Schutzgases geschlossen. Eine Distanzmessung durch diese Öffnung war daher auch nicht mehr möglich.

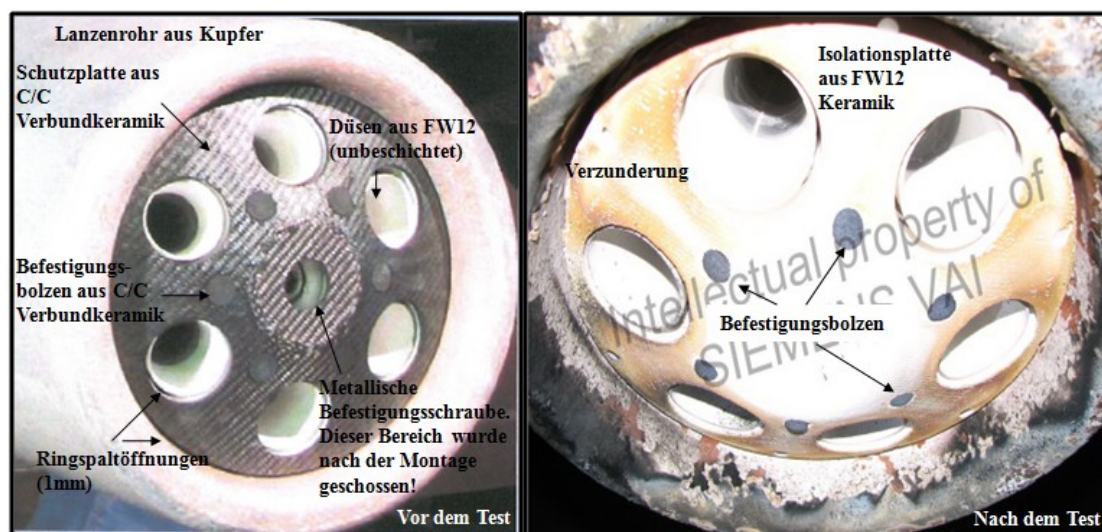
Detaillierte Änderungen der Konstruktion des Lanzenkopfes sowie ihre Auswirkungen auf die Teile werden in folgenden beschrieben.

<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik Montanauniversität A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH) Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	--


### Versuch 1: Vorwärmen des Konverters

Bei dem ersten Versuch bei AME im Oktober 2011 wurde eine Testlanze in einen leeren neu ausgemauerten Konverter eingeführt. Durch den brennenden Sauerstoff aus den Sauerstoffdüsen sollte die neue ausgemauerte Zustellung des Konverters (aus feuerfesten Materialien) auf eine Temperatur von bis zu 1000°C erhitzt werden. Wie in der Abb. 106 (Bild links) zu sehen wurden für diesen Test die Lavadüsen aus dem Material FW12 (unbeschichtet) und einer Wandstärke von 2 mm eingesetzt. Als Isolationsplatte wurde eine Schale aus ebenfalls FW12 (unbeschichtet) mit einer Wandstärke von 2 mm eingesetzt. Diese Schale wurde mit einer Isolationswolle (Aluminiumoxid) zum thermischen Schutz ausgestopft, sodass dieser Verbund insgesamt eine Wandstärke von 20 mm auswies. Zum chemischen Schutz der Isolationsplatte wurde eine 5 mm dicke Schutzplatte aus C/C Verbundwerkstoff genommen. Keiner der getesteten Teile wurde vor dem Test mit BN beschichtet.

Die Testdauer betrug circa 8 Stunden. Der Test wurde alle zwei Stunden kurz unterbrochen um eine visuelle Inspektion der Teile durchzuführen. Nach circa vier Stunden im Einsatz wurden kleine Abtragungen (Abrundungen) des Materials an der Schutzplatte aus Kohlenstoff sichtbar. Diese waren in den Bereichen zwischen den Sauerstoffdüsen bzw. in dem Bereich um die Befestigungsbolzen und Stirnbereich lokalisiert. Da keine weiteren sichtbaren Schäden an Teilen festzustellen waren, wurde der Test fortgeführt. Nach circa 8 Stunden Testzeit wurde die Lanze aus dem Konverter gefahren und inspiziert. Dabei wurde festgestellt, dass die Schutzplatte aus Kohlenstoff nicht mehr vorhanden war. Den Lanzenkopf vor und nach dem Versuch zeigt Abb. 106.



**Abb. 106:** Lanzenkopf vor- und nach dem ersten Versuch (Vorwärmen des Konverters). Die neue Lanze (links im Bild) und die Ergebnisse nach dem Versuch (rechts im Bild). Trotz des Abbrennens der Schutzplatte aus C/C Faserverbundwerkstoff sind die Isolationsplatte und die Düsen aus FW12 Material in einem sehr guten Zustand.

<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik Montanauniversität A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH) Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	--


Im Bild sind die Sauerstoffdüsen, die Isolationsplatte und die Reste der Befestigungsbolzen gut zu erkennen. An den Sauerstoffdüsen aus FW12 Keramik sind optisch keine sichtbaren Schäden zu erkennen. Ihre typische weiße Farbe ist auch nach dem Test fast gleichmäßig erhalten geblieben. Dies deutet auf eine gute Kühlung der Düsen durch die ausströmenden Gase (Sauerstoff und Schutzgas) hin. Nach Information der Kollegen von der Siemens VAI wurden an den Düsen keine weiteren Schäden festgestellt. Offensichtlich hat die Düsenkonstruktion während dieses Tests den Beanspruchungen wie Vibrationen, Gasdruck, Temperatur, Thermoschock und Oxydation standgehalten.

An der Isolationsplatte sind Bereiche mit brauner bis rötlicher Verfärbung zu erkennen. Diese sind vermutlich auf die Verzunderung des Materials aufgrund der hohen Temperaturen im Kontaktbereich mit der Schutzplatte zurückzuführen. Als „Frontplatte“ nimmt die Schutzplatte relativ schnell die Umgebungstemperatur an und leitet sie zur Isolationsplatte weiter. Durch die Reaktion des Kohlenstoffs aus der Schutzplatte mit dem Sauerstoff aus der Umgebung wurde vermutlich zusätzliche Wärme an die Isolationsplatte abgegeben. Auf der Isolationsplatte wurden keine weiteren Schäden festgestellt. Es wurden leider keine Temperaturmessungen an den Schutz- und Isolationsplatten durchgeführt. Es wurde aber die Temperatur der metallischen Befestigungsplatte gemessen. Dabei wurden sehr niedrige Temperaturwerte aufgezeichnet. Zur Beginn des Tests betrug die Temperatur an der Messstelle nur 17 °C. Mit Beginn des Einblasens von Schutzgas hat dieser Wert sogar noch um zwei Grad abgenommen (auf 15 °C). Aufgrund der thermischen Isolationswirkung der Isolationsplatte und der Kühlwirkung des Schutzgases konnte somit die Temperatur der Umgebung (circa 800-900 °C) komplett von der metallischen Platte (15 °C) abgeschirmt werden.

Die in der Isolationsplatte verbliebenen Reste der Befestigungen aus Kohlenstoff zeigen eine feine Abrundung an ihrer Außenseite an. Dies und die Beobachtung, dass das Material von der Schutzplatte relativ langsam abgetragen wurde, deuten auf Oxidation des Kohlenstoffs mit dem Sauerstoff aus der Umgebung als Verschleißursache der Teile hin. Die Oxydation hat in den Bereichen zwischen den Düsen bzw. in der Mitte der Platte angefangen bzw. sie war dort am intensivsten. Dies ist auf die schlechte bzw. im Stirnbereich überhaupt nicht vorhandene Versorgung dieser Bereiche mit Schutzgas zurückzuführen. In einem leeren Konverter ist die Sauerstoffkonzentration (mehr Umgebungsluft) viel grösser als in einem gefüllten Konverter während eines LD- oder AOD- Prozesses. Dadurch wurde vermutlich der Abbrand bzw. die Oxidation des Kohlenstoffs aus der Schutzplatte noch beschleunigt. Da der Konverter während dieses Tests „leer“ war (kein Stahl oder Schlacke), können die anderen damit verbundenen eventuellen Verschleißursachen außer Oxidation ausgeschlossen werden.

Die Standzeit der Schutzplatte aus Kohlenstoff (Wanddicke nur 5 mm) von etwa 4 bis 8 Stunden bei mangelhafter Schutzgasversorgung ist daher als vielversprechend zu beurteilen. Die Schutzplatte bzw. die anderen keramischen Teile wurden während des Tests auch mehreren Thermowechseln unterzogen, da die Lanze alle zwei Stunden ein und ausgefahren wurde. Durch diese Temperaturwechsel sind ebenfalls keine sichtbaren Schäden entstanden.



<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik Montanauniversität A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH) Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	--

Obwohl z.B. die Isolationsplatte aus einer nicht für diesen Zweck empfohlener Keramik (relativ hohe Wärmeleitfähigkeit von 1,2 W/mK) gebaut wurde, konnte sie während dieses Tests die Stahlteile perfekt vor der Wärme im Konverter schützen. Leider wurden während dieses Versuchs keine Temperaturmessungen an den keramischen Teilen durchgeführt, obwohl diese Daten sehr aufschlussreich gewesen wären.

Die auf Basis dieser Erkenntnisse und Informationen werden vom Autor im Kapitel Ausblick konstruktive Vorschläge zur Optimierung des Kopfes getroffen.

### **Versuch 2: „Slag Splashing“ des Konverters**

Bei dem zweiten Versuch wurde die gleiche Lanze (wie im Test 1) erneut eingesetzt. Die Lavaldüsen wurden aus dem Material FW12 (unbeschichtet, Wandstärke 2 mm) und als Isolationsplatte ebenfalls erneut eine Schale aus FW12 (unbeschichtet) mit einer Wandstärke von 2 mm gefertigt. Diese Schale wurde mit einer Isolationswolle (Aluminiumoxid) zum thermischen Schutz ausgestopft, sodass dieser Verbund eine Wandstärke von insgesamt 20 mm auswies. Keiner der getesteten Teile wurde vor dem Test beschichtet. Bei diesem Test wurde auch keine Schutzplatte zum chemischen Schutz der Isolationsplatte eingesetzt.

Die Sauerstofflanze wurde als „Slag Splashing“ Lanze im Konverter eingesetzt. Wie im Kapitel 2.2.4 beschrieben wird bei diesem Vorgang nach dem Entleeren des Konverters ein Teil der Schlacke im Konverter gelassen. Danach wird eine Lanze (meistens eine extra dafür gebaute sogenannte „Slag Splashing Lanze“) mit mehreren seitlichen Öffnungen im Lanzenkopf für den Austritt von Schutzgas bis zur der Schlackenoberfläche gesenkt. Durch heftiges Einblasen von Schutzgas wird die Schlacke gekühlt und gleichzeitig an die Konverterwände geschleudert. Dabei entstehen im Konverter sehr starke Druckschwankungen, die mit turbulenten Strömungen und Bewegungen der Schlacke einhergehen. Der Abstand des Lanzenkopfes zur der Oberfläche der Schlacke bzw. dem Konverterboden ist beim „Slag Splashing“ wesentlich kleiner (etwa 30 -50 cm) als beim LD Prozess (etwa 1,5 m vom Lanzenkopf zur Stahlschmelze).

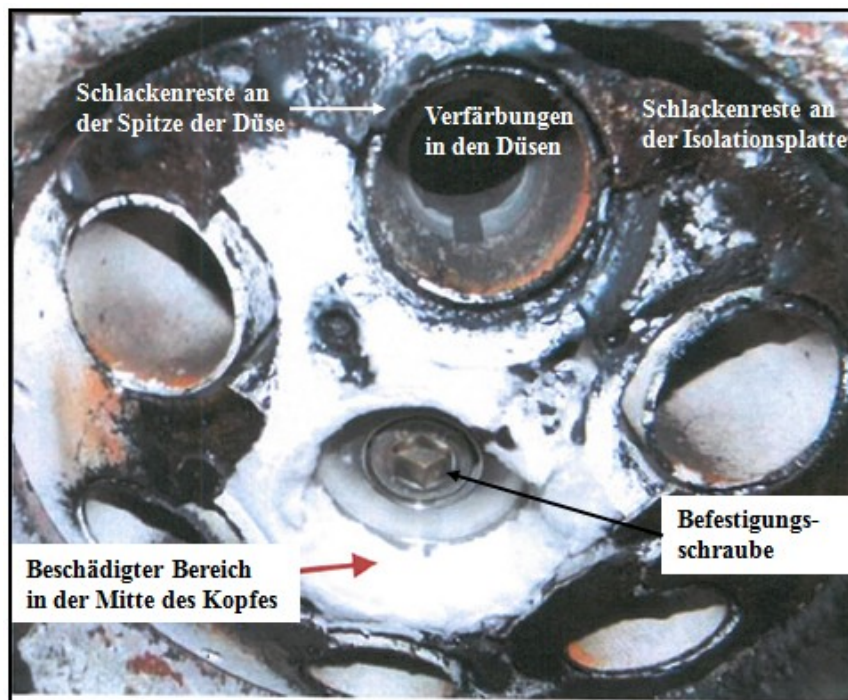
In diesem Versuch wurde kein Schutzgas verwendet, sondern Sauerstoff. Dadurch bzw. durch die exothermen chemischen Reaktionen (z. B. Oxydation von Fe) wurden die Temperaturen in der Schlacke, die normalerweise um etwa 1300°C-1450°C betragen, wesentlich erhöht. Der Test dauerte etwa 5 min.

Den neuen Lanzenkopf nach diesem Versuch zeigt Abb. 107. Es sind schwere Beschädigungen vor allem im Bereich der Befestigungsschraube (Mitte des Kopfes) zu erkennen. Durch den geringen Abstand des Lanzenkopfes zur Schlackenoberfläche bzw. zum Konverterboden und durch das Aufblasen des Sauerstoffs sind sehr Rückströmungen um den Kopf entstanden. Dies trifft insbesondere auch auf das Verhältnis zwischen dem Sauerstoffdruck in der Düse ( $P_1 \sim 1\text{bar}$ ) und dem Druck in der Umgebung ( $P_E \gg 1\text{bar}$ ) zu.






Dies hat vermutlich ein starkes Ansaugen der Umgebungsmedien (Schlacke und Gase) in die Düsen zur Folge gehabt. Die Schäden im Sternbereich sind auf chemische Reaktionen mit der heißen Schlacke und dem damit verbundenen Verschleiß der dünnen und ungeschützten Keramik zurückzuführen. Die Außenbereiche der Isolationsplatte (näher am Ringspalt) sind mit einer dünnen Schicht aus erstarrter Schlacke bedeckt. Hier waren die Temperaturen offensichtlich unter der Schmelztemperatur der Schlacke (etwa 1300 °C). Nach dem Entfernen der Schlackenschicht aus diesen Bereichen waren optisch keine weiteren Schäden an der Keramik festzustellen. Die erstarrte Schlacke (insbesondere in direkter Umgebung des Ringspaltes) ließ sich relativ leicht von der Keramik ablösen, da sie keine stärkere Bindung mit der Keramik eingegangen ist. Die gut erhaltenen Oberflächen der Keramik und ihre weiße Verfärbung in diesem Bereich weisen ebenfalls auf eine schlechte Bindung der Schlacke und Keramik hin. Dass heiße Schlacke an der Oberfläche der Keramik durch die Kühlwirkung vom Schutzgas zuerst erstarrt, bevor sie mit der Keramik chemisch reagiert, wurde bereits bei den Versuchen in Aachen beobachtet. Offensichtlich war auch hier die Schutz- bzw. Kühlwirkung des durch die Ringspaltöffnung ausströmenden Schutzgases zumindest in den Bereichen der Isolationsplatte wirkungsvoll, welche in der Nähe des Ringspaltes liegen.




**Abb. 107:** Der Lanzenkopf nach dem zweiten Versuch („slag splashing“ des Konverters). Randteile der Isolationsplatte sind mit Schlacke überzogen. Teile der Platte (Sternbereich) fehlen. Teile der Innenbereiche der Düsen sind schwarz verfärbt.

<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik Montanauniversität A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH) Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	--

Die Entscheidung, den Lanzenkopf bzw. die Isolationsplatte nur aus (unbeschichteter) FW 12 Keramik ohne dabei eine Schutzplatte zu verwenden, war aus Sicht des Autors nicht zielführend. Sie widerspricht der in dieser Arbeit vorgestellten Vorgehensweise bzw. den entwickelten Ideen zur Konstruktion des Lanzenkopfes. Die chemischen Reaktionen zwischen der Isolationsplatte und den Umgebungsmedien (vor allem der Schlacke), die zum Verschleiß der hier eingesetzten Platte geführt haben, sind in dieser Arbeit bereits in den einleitenden Kapiteln beschrieben worden. So wird im Kapitel 7 aufgezeigt, dass fast alle feuerfesten Werkstoffe mit der LD Schlacke chemisch reagieren. Unterschiedliche Standzeiten werden durch unterschiedliche Reaktionsgeschwindigkeiten der Werkstoffe bzw. unterschiedliche Wandstärken der Proben verursacht. Eine längere Einsatzzeit eines Bauteils aus FW 12 Keramik (unbeschichtet) mit einer Wanddicke von 2 mm war unter diesen Bedingungen nicht zu erwarten.

Bei diesem Test wurden leider keine Temperatur- oder sonstigen Messungen durchgeführt. An den metallischen Teilen (Befestigungsplatte und Teile der Düsen) wurden keine Schäden feststellbar. An den Kupferteilen der Lanzenoberfläche wurde Großteils keine bzw. an manchen Stellen eine geringe bis keine Verbärung festgestellt.

<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik Montanauniversität A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH) Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	--

## 10. Zusammenfassung und Ausblick

In dem ersten Teil der vorliegenden Arbeit wurde eine Studie über dem Stand der Technik und der Problematiken bei der Anwendung der bestehenden Lanzensystems beim LD Verfahren durchgeführt. Dabei wurde festgestellt, dass in der Literatur die Umgebungsbedingungen bzw. die daraus resultierenden Beanspruchungen am Lanzenkopf nicht ausreichend beschrieben bzw. erforscht wurden. Dies hatte oft zur Folge (wie in der Patentübersicht gezeigt und diskutiert), dass einige Versuche, einen neuen Lanzenkopf zu bauen, nicht zum erwünschten Ziel geführt haben. Eine der ersten daraus resultierenden Aufgaben in der vorliegenden Arbeit war die detaillierte und möglichst genaue Beschreibung der am Lanzenkopf bestehenden Beanspruchungen. Auf Basis der vorhandenen theoretischen Arbeiten und eigenen Überlegungen wurden vor allen die Verschleißursachen der Lavaldüsen analysiert.

Ergebnisse dieser Untersuchungen haben zu dem Lösungsansatz (Ringspaltdüse mit Schutzgas) geführt. Dieser konnte auch experimentell bestätigt werden. Bei dieser Lösung sind einige Teile des Lanzenkopfes wie z.B. die Düsen von der Wasserkühlung getrennt worden. Es ist davon auszugehen, dass ein ungekühlter Lanzenkopf nur mit Verwendung keramischer Werkstoffe realisiert werden kann. Auf Basis der festgelegten Kriterien (Temperatur, Thermoschock, chemische Resistenz) konnte die Anzahl der hier anzuwendenden keramischen Werkstoffe eingegrenzt werden. Durch weitere Modellrechnungen und experimentellen Untersuchungen wurden die zu testenden Werkstoffe festgelegt.

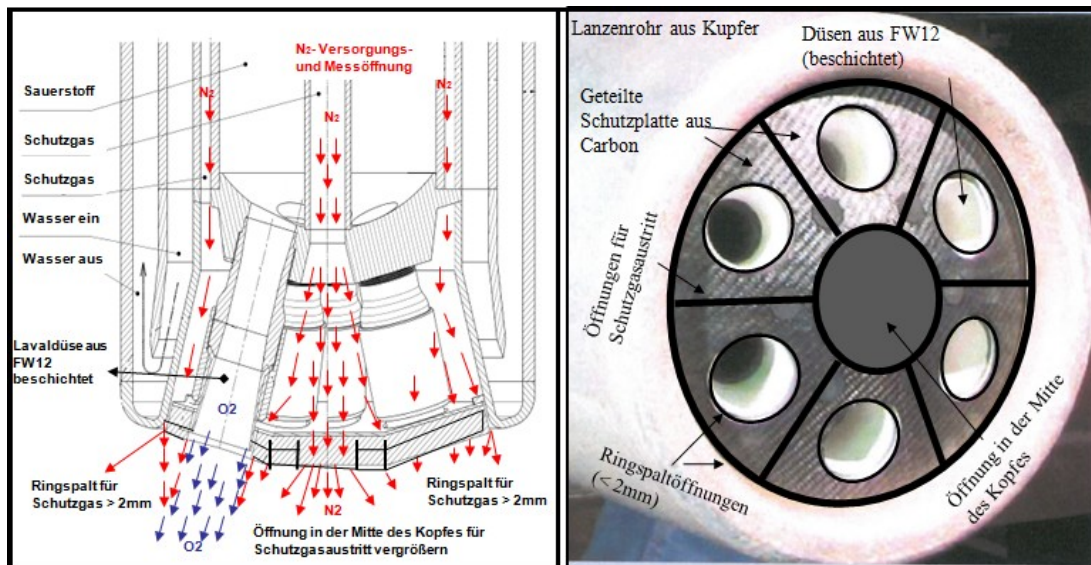
Die einzelnen Teile bzw. die gesamte neue Konstruktion wurde an der RWTH in Aachen in einem 100 kg LD- Konverter experimentell untersucht. Ergebnisse dieser Tests ergeben, dass ein Lanzenkopf bzw. Teile davon aus keramischen Werkstoffen und ohne Wasserkühlung für einen LD- Prozess zu bauen grundsätzlich möglich ist. Insbesondere waren die Ergebnisse des ersten Versuches dieser Versuchsserie für weitere industrielle Anwendungen vielversprechend.

Die im Rahmen dieser Arbeit geplanten Versuche eines neuen Lanzenkopfes für den LD- Prozess an einem 150 t Konverter bei AME, wurden von Siemens VAI leider nicht durchgeführt. Die Entscheidung für weitere Versuche an einem LD- oder AOD Konverter und einer Vermarktung dieser Neuentwicklung liegt allein bei der Firma Siemens VAI als Eigentümer der erteilten Schutzrechte bzw. Patente für diese Düsenkonstruktionen.

Anstatt wie ursprünglich geplant und mit Kunden (AME) vereinbart, wurde die Lanze nicht während des Sauerstoff-Frischens eingesetzt sondern in zwei anderen kurzfristig geplanten Versuchen (Aufheizen des Konverters und Slag-splashing). Aus der Analyse der durchgeführten Versuche, insbesondere der Versuche bei AME geht hervor, dass eine




Optimierung der bestehenden Konstruktion zwecks einer Verlängerung der Lebensdauer der keramischen Teile des Lanzenkopfes auch zielführend wäre. In der Abb. 108 sind mögliche Änderungen dargestellt.



**Abb. 109:** Mögliche Verbesserungen des Lanzenkopfes. Die seitliche und mittlere Schutzgaszufuhr sollen wie in der ursprüngliche Form hergestellt wird bzw. erhalten bleiben. Die Isolationsplatte sollte aus der vorgeschlagenen Keramik (Vakuumformprodukte) mit kleineren Wanddicken hergestellt werden. Die Schutzplatte soll aus Elektrodencarbon, geteilt und mit einer größeren Wanddicken eingesetzt werden. Die Öffnung im Sternbereich des Kopfes soll wie geplant offenbleiben bzw. noch vergrößert werden. Die Düsen sind aus FW12 beschichteter Keramik.

Die Auswertung der Versucher ergibt, dass alle eingesetzten Teile den Beanspruchungen wie: hohe Temperaturen, Thermoschocks, Vibrationen und Gasdrücken zumindest eine Zeit lang standhalten können. Wie erwartet war die korrosive Wirkung der Schlacke auf der Schutzplatte stark ausgeprägt. Insbesondere war dies in jenen Bereichen der Schutzplatte der Fall, wo wenig oder gar kein Schutzgas vorhanden war. Aus diesen Gründen soll bei der Neukonstruktion des Lanzenkopfes unbedingt drauf geachtet werden, dass eine möglichst gute Umhüllung der Schutzplatte mit dem Schutzgas stattfindet. Daher sollte die seitliche-(große) und auch die mittlere Schutzgaszufuhr an die Schutzplatte, so wie ursprünglich geplant, ermöglicht werden. Die Schutzplatte sollte aus dem chemisch resistenten Elektrodencarbon, aber mit einer wesentlich größeren Wanddicken (bis zu 20 mm) als im Test in Eisenhüttenstatt, eingesetzt werden. Um besser mit dem Schutzgas umströmt zu werden, sollte die Schutzplatte so geteilt werden, dass jeweils eine kleine Platte eine Düse umringt. Dadurch entstehen zwischen den Platten zusätzliche Öffnungen „Schlitze“, durch welche das Schutzgas ausströmen kann. Das ausströmende Schutzgas wird durch den mit Überschall strömenden Sauerstoffstrahl angesaugt und bedeckt bzw. umhüllt so die kleinen Schutzplatten

<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik Montanauniversität A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH) Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	--


von allen Seiten effizienter. Die gesamte Schutzgasmenge muss dazu vermutlich nicht erhöht werden. Die Öffnung im Sternbereich des Kopfes bzw. in der Mitte der Platten muss unbedingt erhalten bleiben oder sollte eventuell sogar noch vergrößert werden. Dadurch ist auch im diesen Bereich eine erhöhte Umströmung mit Schutzgases gegeben.

Die Düsen können aus FW12 beschichteten Keramik hergestellt werden. Sie haben sich in den Tests gut bewährt. Um eine noch glattere Innenoberfläche zu bekommen bzw. eine schlechtere Benetzung mit den Schlacken zu haben, sollen sie aber zusätzlich mit BN beschichtet werden. Eine Wanddicke der Düsen von 1 mm ist ausreichend. Die Isolationsplatte kann aus der bereits vorgeschlagenen gut isolierenden Keramik (Vakuumformprodukte, Wärmeleitfähigkeit =0,33W/mK) mit kleineren Wanddicken (etwa 5mm) hergestellt werden.

Eine Machbarkeit einer Konstruktion eines Sauerstofflanzenblaskopfes unter Verwendung von keramischen Werkstoffen wurde durch die Ergebnisse aller durchgeführten Versuche grundsätzlich bestätigt. Weiteres wäre eine Integration der Messsensoren (insbesondere für die Temperatur- und Distanzmessung) in die neue Konstruktion sowie Ihre Erprobung und Optimierung durch weitere Versuche empfehlenswert.

Es sei angemerkt, dass bei einem AOD Konverterprozess nur wenig schäumende Schlacke produziert wird, welche den Lanzenkopf auch selten erreicht, da die Distanz der Lanze zur Badoberfläche in der Regel grösser als beim LD Konverter ist und wesentlich mehr Schutzgas verwendet werden darf. Es gibt weltweit mehr als 1000 AOD Konverter im Betrieb! Weiteres wäre diese Neukonstruktion sicherlich auch für die „Einloch“- Sauerstofflanzen bei RH-Anlagen, Pfannenofen, VD- und VOD-anlagen einsetzbar. Eine Erprobung der neuen Lanze wäre somit auch hier sinnvoll.




<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik Montanauniversität A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH) Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	--


## 11. Referenzen

1. Österreichische Patentschrift Nr.:174069, angemeldet: 31.1.1950. Beginn der Patentdauer: 15.8.1952
2. F. Oeters: Metallurgie der Stahlherstellung, Verlag Stahleisen GmbH Düsseldorf, (1989), S. 2, 4-102
3. Statistisches Jahrbuch der Stahlindustrie, nach (IISI), Verlag Stahleisen GmbH Düsseldorf (10/2005)
4. H. Hiebler: Entwicklung und Stand des LD- Verfahrens (2002), S. 1- 7
5. H. Lachmund: Der Sauerstoffaufblassprozess- Metallurgie und Wechselwirkungen mit dem FF- Material, VDEh- Seminar (2005), S.1-3
6. Siemens VAI Prospekt „Stainless Steelmaking Technology“, (2008)
7. J. M. Gaines: BOF Steelmaking volume one Introduction, Theory, and Design Part I (1982), S. 473-501, 599- 612, 614, 624, 638, 661
8. J. Hartenstein: Feuerfeste Stoffe und Schlacken in der Metallurgie, VDEh- Seminar (2005), S.1-10
9. A. Buhr: Chemie und Mineralogie von feuerfesten Werkstoffen und Schlacken, (2005), S.2-31
10. Deutsche Patentschrift Nr. DE202007009161U1, Sauerstofflanze zum Einblasen von Sauerstoff in metallurgische Behälter, angemeldet: 04.10.2007
11. E. Auberger, Voestalpine Stahl AG Linz, Konverterbetriebsdaten, persönliche Mitteilung, (2008)
12. H.-J. Odenthal, U. Falkenreck, J. Schlüter: CFD Simulation of Multiphase melt Flows in Steelmaking Converters, European Conference on Computational Fluid Dynamics (2006)
13. R. Bruckhaus, V. Fiedler, H. Lachmund: Improvement of the BOF process by use of a radar measurement at the Dillinger Hütte steel plant, International Steelmaking Conference (Paris, 13-14 December, 2000, Session 7). S. 553- 559
14. B. Hnsmann: Kinetik und Dynamik bei tiefen Temperaturen in Lavaldüsenexpansionen, Dissertation an der Mathematisch- Naturwissenschaftlichen Fakultät der Georg-August- Universität zu Göttingen, 2007, S. 44
15. Ch. Brücker: Strömungsmechanik II, Institut für Mechanik und Fluidodynamik, TU Bergakademie Freiberg, (01.09.2007), S. 19-21 und 126
16. Offenlegungsschrift Nr.: DE2057568 „ Vorrichtung zum Einblasen von Gasen in Metallschmelzen, Verfahren zu ihrer Herstellung und ihre Verwendung“ (23.11.1970)
17. Offenlegungsschrift Nr.: EP0261365, Tauchlanze, (06.08.1987)
18. Offenlegungsschrift Nr.: EP0571984, Composite Lance, (26.05.1993)




<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik Montanauniversität A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH) Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	--


- 
19. Offenlegungsschrift Nr.: DE3508618, Blaselanze zur Behandlung von Metallschmelzen in Hüttenwerksanlagen (18.09.1986)
  20. Offenlegungsschrift Nr.: JP63206420, Lance for Blow- Refinement in Converter (08.19.1986)
  21. Offenlegungsschrift Nr.: JP61213311, Blowing Lance for Converter , (03.18.1985)
  22. Offenlegungsschrift Nr.: DE3122178, Ablös- und austauschbarer Hitze- und Spritzschutz für Sauerstoffblaslanzen zur Stahlerzeugung, (20.01.1983)
  23. Offenlegungsschrift Nr.: 06/130308, Lance and method for removing skulls from steelmaking vessels, (03.30.1982)
  24. Offenlegungsschrift Nr.: 3730505, Double Delivery Lance for Refining the Steel in the Converter Processes, (05.09.1973)
  25. Offenlegungsschrift Nr.: 05/202702, Nozzle- Head for a Water- cooled blowing Lance, (08.07.1973)
  26. Offenlegungsschrift Nr.: 05/905007, Lance head for a fining lance, (02.26.1980)
  27. R. Sambasivam, S N. Lenka, F. Durst, M. Bock, S. Chandra, S.K. Ajmani;, a New Lance Design for BOF Steelmaking, Metallurgical and Materials Transactions ( 02.2007) S. 45- 53
  28. R. Sambasivam, S N. Lenka, F. Durst, M. Bock, S. Chandra, S.K. Ajmani;, a New Lance Design for BOF Steelmaking, Metallurgical and Materials Transactions ( 02.2007) S. 45- 53
  29. R.D. Pehlke, W.F. Porter, R.F. Urban, and J.M. Gaines: BOF Steelmaking, Introduction, Theory and Design, Part I (ISS, Warrendale, PA, 1982), S. 597
  30. G. Aichinger, J. Schenk, S. Pirker; POSCO FINEX 1.5M O2 TUYERES - CFD CALCULATION: Siemens VAI Metals Technologies GmbH, Final Report, 12.07.2007
  31. C. Oehler, M. Bock, M. Thiel; „The influence of design and process operation on BOF lance tip life“, Saar-Metallwerke GmbH, <http://www.millennium-steel.com>, 2004
  32. S. Havelia, M. Malathi, B. Deo; Heat transfer analysis of lance sculling in top blown oxygen steelmaking; International Symposium of Research Students on Material Science and Engineering; December 20-22, 2004, Chennai, India
  33. Patent Nr.: US 6,599,464; “Steelmaking Lance With Integral Temperature Probe” (29.06.2003)
  34. J. Hartenstein; Beanspruchung der Zustellung in Konverter, VDEh- Seminar Feuerfest-Technologie Teil 1, (29.11.2006) S. 8, 9, 72- 83
  35. E. A. Fuchs, M. P. Bonin, S. Jensen, J. Sackos, C. Smith, D. Goldstein, N, Jr, Rymarchyk, D. R. Hardesty, New optical sensor for improved BOF control: lance-based temperature and laser distance measurement, Iron and Steel Engineer (USA). Vol. 75, no. 7, pp. 25-31. July 1998
  36. HENZE Born Nitride Products GmbH, Datenblatt, HeBoCoat® Bornitrid Suspensionen & Sprays, 2011
  37. G. Buchebner; Magnesia-, Magnesiachromit- und Magnesiakohlenstoff- Steine in der Metallurgie, VDEh- Seminar Feuerfest- Technologie Teil 1, (28.11.2007) S. 4- 6

<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik Montanauniversität A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH) Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	--

38. M. Lekic-Ninic, S. Lechner, H. Kerschbaum, E. Reisenberger, H. Traxinger, P. Wimmer: Sauerstoffblaslanze mit Schutzelement, WIPO Patent Applikation WO 2009/153128 A1, 23. Dez. 2009
39. M. Lekic-Ninic, S. Lechner, J. Schenk, G. Aichinger, F. Berner, J.F. Plaul, M. Schmidt, T. Soentgen, B. Vuletic, K. Wieder, J. Wurm; Düse zum Eindüsen vom sauerstoffhaltigem Gas in ein Roheisenaggregat: WIPO Patent Application WO 2010/060770 A1, 03.06.2010
40. E. Fritz, J. Steins; Outline of Stainless Steel Production with an Emphasis on the K-OBM-S Process, BHM, 140.Jg. (1995), Heft 5, S. 6-7
41. P. Mathur and C. Messina; Praxair CoJet™ Technology – Principles and Actual Results from Recent Installations, AISE Steel Technology (USA). Vol. 78, no. 5, pp. 21-25, May 2001
42. Informationszentrum Technische Keramik im Verband der Keramischen Industrie e.V.; Brevier TECHNISCHE KERAMIK, Verlag Hans Carl, 4. Auflage, (22. Mai 2009) Bild 131-135
43. G. Routschka; Praxishandbuch Feuerfeste Werkstoffe, 5. Auflage, (05.09.2011)
44. G. Buchebner; Feuerfest-Grundlagen Begriffsbestimmungen, Rohstoffe, RHI GP Weilguni, Version D0304, S. 7
45. D. Munz, T. Fett; Mechanisches Verhalten keramischer Werkstoffe, Springer Verlag, Berlin (1989)
46. R. Morrell; Handbook of properties of technical & engineering ceramics, Part 1: An introduction for the engineer and designer; national Physical Laboratory, London (1989)
47. W.E.C. Creyke, I.E.J. Sainsbury, R. Morrell: Design with non-ductile Materials, Applied Science Publishers (1993)
48. R.W. Davidge, M.H. van de Voorde: Designing with Structural Ceramics; Commission of the European Communities, Elsevier Applied Science, 1990
49. R. Danzer: Schadensanalyse und technische Zuverlässigkeit keramischer Bauteile. in: Grellmann, W. (Hrsg.): Werkstoffprüfung. 643 S. 77-84. DVM Bericht. Deutscher Verband für Materialforschung und -prüfung e.V. Berlin, 2011
50. R. Danzer: Lebensdauerprognose hochfester metallischer Werkstoffe im Bereich hoher Temperaturen. Gebr. Borntraeger, Stuttgart, 1988
51. K. Sindermann: Langzeitverhalten eines SiC/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Faserverbundwerkstoffs, Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), Schriftenreihe des Instituts für Keramik im Maschinenbau, IKM 028, (12. 1999) S. 15 ff
52. W. Krenkel: Keramische Verbundwerkstoffe, DGM Informationsgesellschaft Verlag, (1996) S. 3 ff
53. M. Schmücker: Temperaturabhängige Gefügeveränderungen in keramischen Fasern und Faserbeschichtungen; Werkstoffwoche '96, DGM Informationsgesellschaft Verlag (1997) Band 6, S. 891 ff

<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik Montanauniversität A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH) Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	--

- 
54. M. Backhaus-Ricoult, D. Imhoff, N. Mozdierz: Analytical and structural investigations of SiC-SiC composites by TEM with EDX, EELS and HREM; Euro Ceramics 4, Vol. 3 (1995), grupp editoriale faenza editrice, S. 351 ff
55. W.E. Pritzkow Spezialkeramik: Datenblatt Oxidkeramischer Faserverbundwerkstoff Keramikblech, Website: [www.keramikblech.com](http://www.keramikblech.com), Stand 02/2011
56. S. Fliegner, M. Gall, B. Thielicke, W.E. Pritzkow: Einfluss des Matrixdesigns auf die Eigenschaften oxidkeramischer Faserverbundwerkstoffe, <http://www.keramikblech.com>, 15.11.2010
57. W. Krenkel : Ceramic Matrix Composites, 2008, ISBN 978-3-527-31361-7
58. C. Levi, et al.: Microstructural Design of Stable Porous Matrices for All-Oxide Ceramic Composites, Z. Metallkd. 90 (1999) 12, S. 1037-1047
59. W.E.C. Pritzkow: Oxidkeramische Faserverbundwerkstoffe für Spezialanwendungen in Industrie und Forschung, Faserkeramik-Kolloquium (November 2009), Köln
60. J. Hartenstein: Feuerfestmaterial und Zustellungskonzepte für Pfannen, VDEh- Seminar Feuerfest- Technologie Teil 2, (2011) S. 7- 8
61. J. Pötschke: Feuerfestkorrosion durch Stahl und Schlacken, VDEh- Seminar Feuerfest- Technologie Teil 1, (29.11.2006) S. 4
62. DIN EN 1094-1: Feuerfeste Erzeugnisse für Wärmedämmzwecke - Teil 1: Terminologie, Klassifizierung und Prüfverfahren für Erzeugnisse aus Hochtemperaturwolle zur Wärmedämmung; Deutsche Fassung EN 1094-1:2008
63. Datenblatt: Keramikfaser Produkte, KAGER GmbH Industrieprodukte, [www.kager.de](http://www.kager.de), 2011
64. RATH AG: Vakuumformteile Anwendung und Produktbeschreibung, [www.rath.at](http://www.rath.at), 2008
65. Datenblatt: Vakuumgeformte Hochtemperaturqualitäten, ALFATEC GmbH, [www.alfatec.co.at](http://www.alfatec.co.at), Stand 30.01.2006
66. T. Helmer: Einfluss einer Faserbeschichtung auf die mechanischen Eigenschaften von Endlosfasern und C/SiC- Verbundwerkstoffen, Dissertation; Fakultät Chemie; Stuttgart; 1992
67. G. Lotta: Temperaturabhängige Gefüge- und Eigenschaftsänderungen eines C/C- Faserverbundwerkstoffs mit optionaler Oxidationsschutzbeschichtung, Dissertationsarbeit an der Universität Bremen, Dez. 2010
68. S. Beyer, H.F.S. Knabe: Development and testing of C/Sic Components for Liquid Rocket Propulsion Applications, 35th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibition. Los Angeles, (1999) P. 1-11
69. Datenblatt: SIGRABOND® Carbonfaserverstärkter Kohlenstoff und Graphit, SGL CARBON GmbH, [www.sglgroup.com](http://www.sglgroup.com), 2011
70. M. Lekic-Ninic, S. Lechner, H. Kerschbaum, H. Traxinger, P. Wieser: Schutzgasgekühlte Sauerstoffblaslanze, WIPO Patent Applikation WO 2010/076214 A1, 08. Jul 2010

<b>Institut für Struktur- und Funktionskeramik Montanauniversität A – 8700 Leoben</b>	<b>Dipl.-Wirt.Ing (FH) Marinko Lekic-Ninic</b>	 Oktober, 2012
---	--	---

- 
71. M. Lekic-Ninic, S. Lechner, H. Kerschbaum, H. Traxinger, P. Wieser:, A. Fleischhandler, A. Hackl, P. Wimmer: Teilweise Gasgekühlte Sauerstoffblaslanze, Österreichisches Patentamt Nr.: AT 508 664 B1, 15. Merz 2011
72. M. Pletz, R. Danzer: Finite Elemente Modelle für die Sauerstoffblaslanze, 27. Oktober 2010
73. M. Hofstätter, W. Harrer, R. Danzer: Thermische Untersuchung von Keramikfaserplatten 1850, ISFK- Bericht 09-2010, 2010, 19 Seiten
74. EN 993-11: Prüfverfahren für dichte, geformte feuerfeste Erzeugnisse - Bestimmung der Temperaturwechselbeständigkeit (1997)